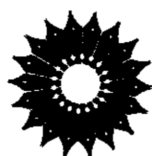


# اصول مهندسی و علم مواد

لارنس اچ. ون‌ولک

ترجمهٔ فخرالدین اشرفی‌زاده، فریبا سعادت، اردشیر طهماسبی، احمد منشی



# اصول مهندسی و علم مواد

لارنس اچ. ون ولك

ترجمهٔ

فخرالدین اشرفی زاده

فریبا سعادت

اردشیر طهماسبی

احمد منشی

مرکز نشر دانشگاهی، تهران

(مواد) متالورژی
۸

مرکز نشر دانشگاهی
۶۱۸



*Elements of Materials Science and Engineering*
Lawrence H. Van Vlack
Fourth Edition
Addison-Wesley, 1980 .

*اصول مهندسی و علم مواد*
تألیف لارنس اچ. ون ولک
ترجمهٔ دکتر فخرالدین اشرفی‌زاده، مهندس فریبا سعادت، دکتر اردشیر طهماسبی، دکتر احمد منشی
ویراستهٔ مهندس زهرا سلطانپور دهکردی
مرکز نشر دانشگاهی
چاپ اول ۱۳۷۱
چاپ ششم ۱۳۸۶
تعداد ۳۰۰۰
حروفچینی: عبدی
لیتوگرافی: کوهرنگ
چاپ و صحافی: وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی، سازمان چاپ و انتشارات


فهرست‌نویسی پیش از انتشار کتابخانهٔ ملی جمهوری اسلامی ایران

ون ولک، لارنس — Van vlack, Lawrence H.
اصول مهندسی و علم مواد / لارنس اچ. ون ولک؛ ترجمهٔ فخرالدین اشرفی‌زاده ... [و دیگران]. ــ تهران: مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۱.
نه، ۶۹۲ ص.: مصور، جدول، نمودار. ــ (مرکز نشر دانشگاهی؛ ۶۱۸. (مواد) متالورژی؛ ۸)
فهرست‌نویسی بر اساس اطلاعات فیپا.
عنوان اصلی: Elements of material science and engineering.
چاپ ششم: ۱۳۸۶. ISBN 978-964-01-0618-1
۱. مواد صنعتی. الف. اشرفی‌زاده، فخرالدین، ۱۳۳۴ -     ، مترجم. ب. مرکز نشر دانشگاهی. ج. عنوان.
۶الف۹و/TA۴۰۲ — ۶۲۰/۱۱
۱۳۷۱
کتابخانهٔ ملی ایران — ۱۱۷۵ـ ۷۱م

بسم الله الرحمن الرحیم

## فهرست

| عنوان | صفحه |
|---|---|

| عنوان | صفحه |
|---|---|
| ۴ـ۵ مواد غیربلوری | ۱۵۹ |
| ۴ـ۶ ارتعاشات اتمی | ۱۶۵ |
| ۴ـ۷ نفوذ اتمی | ۱۷۱ |
| ۴ـ۸ فرایندهای نفوذ | ۱۷۹ |
| مرور و بررسی مطالب | ۱۸۳ |
| خلاصه | ۱۸۳ |
| سؤالات تشریحی | ۱۸۴ |
| مسائل | ۱۸۵ |
| **۵ حرکت الکترون در جامدات** | ۱۹۲ |
| چشم‌انداز فصل | ۱۹۲ |
| هدف از مطالعه | ۱۹۳ |
| ۵ـ۱ حاملهای بار الکتریکی | ۱۹۳ |
| ۵ـ۲ رسانندگی فلزی | ۱۹۶ |
| ۵ـ۳ عایقها | ۲۰۳ |
| ۵ـ۴ نیمرساناهای ذاتی | ۲۰۴ |
| ۵ـ۵ نیمرساناهای خارجی | ۲۱۵ |
| ۵ـ۶ وسایل نیمرسانا | ۲۲۱ |
| مرور و بررسی مطالب | ۲۲۷ |
| خلاصه | ۲۲۷ |
| سؤالات تشریحی | ۲۲۸ |
| مسائل | ۲۲۹ |
| **۶ فلزات تک‌فاز** | ۲۳۵ |
| چشم‌انداز فصل | ۲۳۵ |
| هدف ازمطالعه | ۲۳۶ |
| ۶ـ۱ آلیاژهای تک‌فاز | ۲۳۶ |
| ۶ـ۲ انجام فرایند روی آلیاژهای تک‌فاز | ۲۴۲ |
| ۶ـ۳ تغییرشکل کشسان | ۲۴۴ |
| ۶ـ۴ تغییرشکل پلاستیکی در داخل تک‌بلورها | ۲۴۹ |
| ۶ـ۵ خواص فلزاتی که تغییرشکل پلاستیکی یافته‌اند | ۲۵۷ |
| ۶ـ۶ تبلورمجدد | ۲۶۲ |
| ۶ـ۷ رفتار فلزات چندبلوری | ۲۶۸ |

| عنوان | صفحه |
|---|---|

| عنوان | صفحه |
| --- | --- |

## پیشگفتار

علم و مهندسی مواد در ۲۵ سال گذشته زمینهٔ تحقیقات بسیاری را به‌خود اختصاص داده است. محور اصلی این پیشرفت آن است که خواص و رفتار مواد به‌ساختار داخلی آنها بستگی نزدیك دارد. درنتیجه برای بهبود خواص باید تغییرات مناسبی در ساختار داخلی ایجاد شود. همچنین، اگر انجام عملیات یا شرایط کار، ساختار را تغییر دهد، مشخصات مواد نیز تغییر می‌کند.

دراین دورهٔ رشد و ترقی، تغییرات قابل‌ملاحظه‌ای در روشهای آشنا کردن دانشجویان فنی دورهٔ لیسانس با علم و مهندسی مواد به‌وجود آمده است. دوره‌های مقدماتی موجود به‌جای آنکه مانند ۱۵ تا ۲۵ سال پیش خلاصه‌ای ازمطالب پیچیدهٔ شیمی و فیزیك حالت جامد باشد، براساس دوره‌های شیمی و فیزیك پایهٔ دانشکده برنامه‌ریزی شده است. چاپهای دوم (۱۹۶۴) و سوم (۱۹۷۵) این کتاب به‌این روند کمك کرده است.

درحال‌حاضر روند دومی درآموزش مقدماتی مواد وجود دارد. دراین‌روند، وسایل کمك آموزشی را برای دانشجو در نظر می گیرند به‌طوری‌که متن کتاب مقدماتی چیزی بیش از مفاهیم متشکل و رابطه‌های مفید را ارائه دهد. چاپ قبلی این کتاب با ترکیب چشم‌انداز فصل، تأکید بیشتر روی محاسبات به‌عنوان روش یادگیری، عنوانهای بحث، و بخشهای مرور و خلاصهٔ مطالب درآخر هربخش این روند را دنبال می‌کرد. بنیاد ملی‌علم که عهده‌دار ترویج و بسط روشهای آموزشی برای تدریس مهندسی و علم مواد است، در راه به‌وجود آوردن وسایل کمك آموزشی برای تمام عنوانهای مواد کوششهای متمرکزی درسطح کشور امریکا مبذول داشته است.

چاپ جدید کتاب علم مواد و مهندسی براساس مزایای چاپ سوم طراحی شده است، و به‌بسط آنچه خودآموزی را تسهیل می‌کرده، پرداخته است. در عین‌حال در صدد نگهداشتن‌مزایای متعدد موجود درقطع و شکل کتاب درسی به‌عنوان مرجع مقدماتی برآمده است مثل تجمع دوره، قابلیت حمل، در دسترس افراد و قابل استفاده بودن. درچاپ قبل، آنچه بیش‌از همه مورد پسند دانشجویان قرارگرفت مجموعهٔ مسائل نمونه بود. تعداد آنها در این چاپ تقریباً دو برابر شده و به ۲۰۰ می‌رسد. علاوه براین برای تعیین موقعیت

مبحث، هدف از مطالعه نیز در چشم‌انداز هرفصل اضافه شده است. تقاضای اساتید مختلف سبب افزایش تعداد مسائل شده است که در حال حاضر به‌بیش‌از ۶۰۰ مسئله می‌رسد. علاوه براین مسائل به دو بخش تقسیم شده‌انـد. قسمت اول مسائل امتحانی است (کـه با اعداد ایرانیك مثل ۱ـ۶ـ۱ مشخص شده‌اند) این مسائل بسیار شبیه به‌مسائل نمونـه یـا مستقیماً مربوط به‌فرمولهای موجودنـد. هدف آنها فراهم آوردن امکانات بیشتر بـرای آمادگی دانشجویان قبل از رسیدن به‌مسائلی است که به تجزیه و تحلیل بیشتر و/یا جمعبندی بیشتر عنوانهای قبلی نیاز دارد. (اینها با اعداد سیاه مثل **۱ـ۶ـ۲** مشخص می‌شونـد) و بالاخره در سؤالات تشریحی برای استفاده درکلاس تجدیدنظر و به‌تعداد آنها افزوده شده است، زیرا ازاین روش آموزش می‌توان به‌عنوان مکمل درسهای داده شده استفاده کرد.

طرح کلی چاپهای قبل حفظ شده است، بدین ترتیب کـه به‌خواص مهندسی جالب بیشترین توجه شده و اصول پیوندهای شیمیایی مربوط بـه آنچـه در شیمی عمومی به‌آن برخورد می‌کنیم دوره شده‌است(فصل ۲). ویژگیهای‌ساختاری درسطوح اتمی و الکترونی درفصول ۳ تا ۵ مورد توجه قرارگرفته است تا مبنایی برای خواص تکفاز (الف) فلزات درفصل ۶؛ (ب) پلی‌مرها درفصل ۷؛ و (ج) سرامیکها درفصل ۸ مهیا شود. مواد چند فاز در فصول ۹ تـا ۱۱، با تأکید مداوم روی نمودارهای فازی، میکروساختار، و روشهای به‌وجود آوردن خواص مطلوب بـا کنترل میکروساختار، ارائـه شده‌انـد. اهمیت بسیار خوردگی‌موجب شده‌است‌که فصل۱۲ به‌طورجداگانه بدان اختصاص یابد. فصل۱۳ به‌طور اساسی‌تغییرکرده است. درحال حاضر این‌فصل به‌چهار ماده‌ای‌که‌کاربرد بسیار دارند: چدن، بتن، مواد چند سازه، و چوب می‌پردازد. این مواد گرچه پیچیده‌اند ولی هریك نشاندهندهٔ رابطه بین ساختار و خواص‌اند. این فصل طوری نوشته شده است کـه مدرس می‌توانـد برحسب فرصت و نیازهای تحصیلی محلی، ازیك یا چند بخش آن استفاده‌کند یا هیچ‌کدام را مورد بحث قرار ندهد.

سایر تغییرات اساسی شامل بازنویسی اثر انـدازهٔ دانه‌ها برخواص در فصل ۶، و آشنایی با سینتیك بـاز بلوری توسط تابکاری و کار گرم است. انجام فرایندها در نقاط مختلف در سراسر این چاپ مورد توجهٔ بیشتری قرارگرفته است. هدف، آن نیست که از این نوشته، کتابی در مورد فرایندهای تولید، به‌وجود آیـد. بلکه هدف ما این است کـه به‌دانشجویان نشان دهیم مفهوم «ساختار-خواص» به‌انجام فـرایند و نیز رفتار درحال کار تسری می‌یابد. «موارد تماس» با انجام فرایندهـا موجب می‌شودکـه مدرس بـا مثالهایی دربارهٔ انجام فرایندکه خارج ازتجربه اوست، آشنا شود.

درسراسر این چاپ از واحدهای SI به‌عنوان ابعاد اولیه استفاده شده است.

مثل چاپهای قبل، بخشها و قسمتهایی مشخص شده‌اند کـه مدرس می‌تواند به‌تناسب وقت یا برای دوره‌های تکمیلی استفاده‌کند. عنوانهایی‌که با مربع توخالی (□) علامت‌گذاری شده‌اند حاوی مطالبی‌اند کـه برای بخشهای بعد (علامت‌گذاری نشده) پیش‌نیاز محسوب نمی‌شوند.

از اینکه امکان تشکر از فرد فرد دانشجویان بی‌شماری که در دانشگاه میشیگان برای این چاپ جدید به‌نحوی کمك کرده‌اند، وجود ندارد، متأسفم ولی این دانشجویان باید بدانندکه کمکهای آنان موجب قدردانی بسیار است. این چاپ را به **دانشجویان امروز که مهندسین فردا خواهند بود تقدیم می‌کنم.**

**لارنس، اچ، ون ولك**
آن آربور، میشیگان
سپتامبر ۱۹۷۹

## مقدمه

## مواد درخدمت بشر

### موریس کوهن

همه چیز اطراف ما را مواد تشکیل می‌دهند؛ این مواد همچنان که در وجود ما قرار دارند در فرهنگ و افکار ما نیز ریشه دوانده‌اند. در حقیقت مواد آنچنان با ظهور و عروج بشر رابطهٔ نزدیك داشته است که نامهای سنگ، مفرغ، و آهن را به دورانهای تمدن اطلاق کرده‌اند. مواد طبیعی و ساختهٔ دست بشر جزئی لازم در زندگی ما شده‌اند، چنانکه اغلب آنها را رایگان می‌دانیم وبا وجود این مواد به‌غذا، فضای زندگی، انرژی و اطلاعات که منابع اصلی گذران زندگی بشرند نیز اطلاق می‌شود. مواد درحقیقت دستمایهٔ کار درجامعه است و نه تنها در روش زندگی بلکه درامنیت و آسایش ملتها نقش قاطعی دارد.

اما مواد چیستند؟ چطور آنها را می‌شناسیم، می‌سازیم و به‌کار می‌بریم؟ البته مواد بخشی ازماده موجود درعالم‌اند، ولی به‌طور دقیقتر اجسامی‌اند که به‌علت خواص خود در سازه‌ها، ماشینها، وسایل یا تولیدات کاربرد دارند. مثلا این اجسام شامل فلزات، سرامیکها، نیمرساناها، ابررساناها، پلی‌مرها (پلاستیکها)، شیشه‌ها، دی‌الکتریکها، فیبرها، چوب، ماسه، سنگ و بسیاری مواد چندسازه می‌شوند. تولید و تغییر شکل این مواد به‌کالاهای ساخته‌شده تقریباً یك پنجم مشاغل و محصولات ناخالص ملی را در ایالات متحده دربرمی‌گیرد.

از آنجا که بدن انسان را می‌توان به‌صورت ساختار یا ماشین یا ابزاری در نظر گرفت، می‌توان در بین طبقات مواد ازغذاها، داروها، مواد حیاتی، کودها و غیره نیز نام برد. ولی در حال حاضر چنانکه معمول است شناخت این مواد را به‌علوم کشاورزی و زیستی واگذار می‌کنیم. به‌همین دلایل حتی سوختهای فسیلی، آب و هوا نیز شامل این تعریف کلی مواد می‌شوند، این مواد معمولا درمباحث دیگر مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

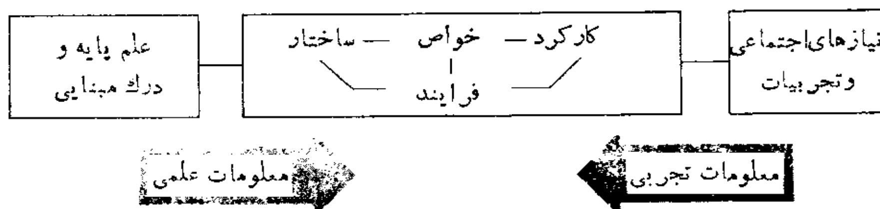
مواد در دسترس نوع بشر را می‌توان درحال‌جریان در چرخهٔ وسیع مواد تصور کرد، یك سیستم فراگیر گهواره ـ گور مواد خام توسط کان کنی، مته‌کاری، حفاری و جمع‌آوری از زمین، برداشت‌شده سپس به مواد حجیمی مانند شمشها، سنگهای خردشده، مواد پتروشیمی

و الوار تبدیل می‌شود؛ به دنبال آن برای برآوردن نیازهای اجتماع به‌محصولات نهایی، به‌صورت مواد مهندسی مانند سیمهای برق، فولادسازه‌ها، بتن، پلاستیکها، و تخته چندلا درمی‌آید. درنهایت پس‌از انجام وظایف محوله درخدمت بشر، این‌مواد در راه بازگشت خود به‌زمین به‌شکل قراضه درمی‌آیند، یا ترجیحاً دوباره وارد چرخهٔ انجام فرایند مجدد می‌شوند و قبل‌از، ازبین رفتن نهایی، بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

جنبهٔ مهم مفهوم چرخهٔ مواد آن است‌که تأثیر متقابل مواد، انرژی و محیط زیست و اینکه هر سهٔ اینها باید درطرح و برنامه‌ریزی ملی و ارزیابی تکنولوژیکی درنظر گرفته شوند، را آشکار می‌سازد. به‌علت کمبود روزافزون انرژی و مواد، درست در زمانی که ساکنان این سیاره توجه عمیقتری به‌کیفیت فضای زندگی خود نشان می‌دهند درنظر گرفتن موارد فوق به‌طور ویژه‌ای اهمیت دارد. به‌عنوان مثال دراین مورد، اگر قراضهٔ آلومینیم را بتوان به‌نحو مؤثری بازیابی کرد، فقط به یك بیستم انرژی لازم برای به‌دست‌آوردن همین مقدار آلومینیم ازکانی نیاز دارد و زمین به‌همان اندازه ازعملیات استخراج مربوط به‌آن کمتر صدمه می‌بیند.

درنتیجه چرخهٔ مواد سیستمی است‌که منابع‌طبیعی ونیازهای بشر را درهم می‌پیچد. مواد به روشی فراگیر، رشته‌های ارتباطی جهان را تشکیل می‌دهندکه نه‌تنها در این سیاره ملتها و اقتصاد آنها را بلکه جزئیترین مواد طبیعی را نیز به‌هم‌گره می‌زنند.

بنابراین روشن است که در مسیر رشد دانش بشری، از اینکه علم مواد و مهندسی جای خود را بین سایر موضوعات مورد نیاز یافته است وکوشش می‌کندکه توانایی بشر را گسترش دهد جای تعجبی وجود ندارد. به‌طور ساده می‌توان گفت علم و مهندسی مواد ($MSE$) مشتمل است برایجاد وکاربرد دانش مربوط به‌ترکیب شیمیایی، ساختار، و تغییر شکل دادن مواد برای به‌دست‌آوردن خواص و کاربرد آنها. چنانکه در شکل I دیده می‌شود پیوندی وجود دارد که ساختار، خواص، فرایند، عملیات، و کارکرد مواد را به‌هم مربوط می‌کند. علم و مهندسی مواد به‌عنوان یك بند معرفت-کردار عمل می‌کند که از علوم پایه و تحقیقات بنیادی (درطرف چپ) تا نیازهای‌اجتماعی و تجربیات(درطرف راست) گسترده



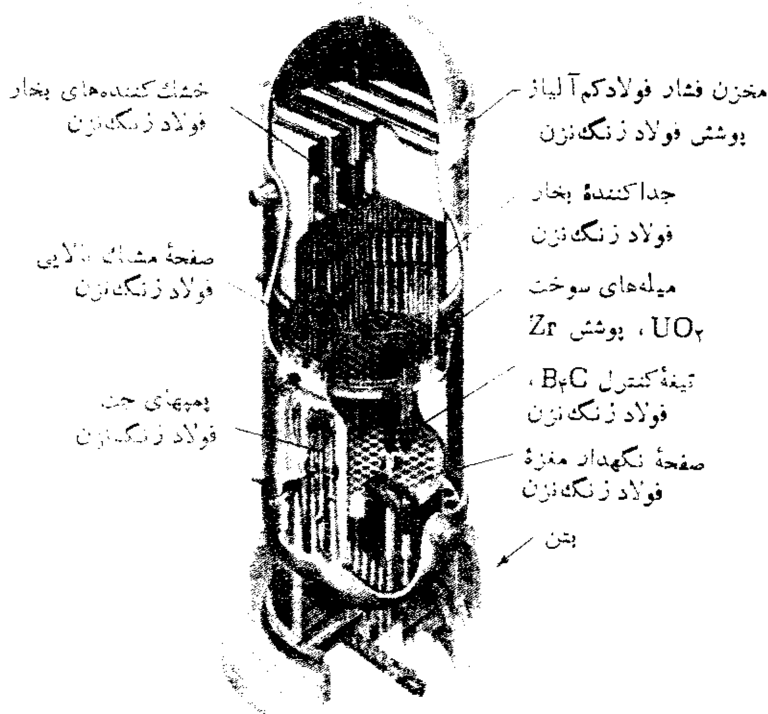

**شکل I** نمودار عناصر اصلی علم و مهندسی مواد درمورد دو جریان معلومات علمی و تجربی که خلاف هم‌اند.

است. جریانهای متقابل درك علمی از یك‌سو و اطلاعات تجربی از سوی دیگر در علم و مهندسی مواد به‌نحو بسیار مؤثری باهم ترکیب می‌شوند.

اگر بخواهیم دراین‌طیف سهم علم مواد را مشخص کنیم، توجه خود را روی‌شناخت طبیعت مواد متمرکز می‌کنیم، این امر به‌نظریات و توصیفاتی منجر می‌شود کـه چگونگی ارتباط بین‌ساختار با ترکیب شیمیایی، خواص، و رفتار مواد را توضیح می‌دهد. ازطرف دیگر، بخش مهندسی مواد دراین طیف با سنتز و کاربرد شناخت تجربی و بنیادی سروکار دارد. و بدین وسیله به‌گسترش، آماده‌سازی، اصلاح و کاربرد مواد در برآوردن نیازهای ویژه می‌پردازد. آشکار است‌که تفاوت بین علم مواد ومهندسی مواد در درجهٔ اول یکی از جنبه‌ها یا نکات مورد تأکید است؛ خطی برای تعیین حدود دو حوزه وجود ندارد و دلایل ما برای اختیار نام ترکیبی علم و مهندسی مواد با پیشرفت کار منطقیتر می‌نماید.درحقیقت، این‌کتاب درسی بـا استفاده از واژهٔ علم مواد به‌طورکلی، بـرای نتیجه‌گیری بسیاری از جنبه‌های مهندسی مواد این دو را هم ازنظر عنوان و هم از نظر محتوا بههم پیوند می‌دهد.

شکلهای II و III انتخاب وکارکرد مواد را در دوکاربرد نشان می‌دهندکه هرکدام به‌ارزیابیهای حرفـه‌ای متعددی شامل کارکرد، قابل اعتماد بودن، قابل تعمیر بودن، صرفه اقتصادی و مسائـل محیطـی نیاز دارد. در واکنشگر هسته‌ای نشان داده شده، سوخت از گندله‌های اورانیم اکسید درپوششی از آلیاژ زیرکونیم تشکیل شده است‌که درمقابل‌گرما مقاوم است و نوترونها را تلف نمی‌کند. شار نوترونی و بنابراین دمای سوخت در حین عمل، توسط وسیله‌ای ازجنس بور کاربیدکـه می‌تواند نوترونها را به‌طور دلخواه جذب کند، کنترل می‌شود ولی این‌وسیله باید توسط فولاد زنگ‌نزن دربرابر خوردگی محافظت شود. بخار تولید شده درظرف تحت فشاری در بیرون جمع‌آوری می‌شود؛ این ظرف از فـولاد کم‌آلیاژ ساخته شده تـا استحکام کافی را با هزینهٔ معقول تأمین‌کند، ولی با فـولاد زنگ‌نزن گرانقیمت پوشش داده شده تـا در برابر خوردگی محافظت شود. این تبدیـل انرژی هسته‌ای،سیستم مواد پیچیده‌ای داردکه درآن مواد برگزیده باید دست به‌دست هم، ورای کارکرد ویـژهٔ خود، عمل‌کنند و این، یك کاربرد شگفت‌انگیز مواد درتولید انرژی است. برعکس تقریباً نیمی ازانرژی مصرفی توسط صنایع سازنده درایالات متحده صرف تولید و شکل دادن مواد می‌شود.

سیستم دیگر مواد کـه نقش مواد در ساختن مسکن را نشان می‌دهـد در شکل III نمایش داده شده است. اگرچه ممکن است خانه‌سازی از نظر علم مواد و مهندسی موردی پیش پا افتاده‌تر از واکنشگر هسته‌ای باشد، ولی با وجود این مثالی کـه آورده‌ایم یکی از موارد استثنایی‌است؛ زیرا این‌خانه تقریباً به‌طورکامل ازمواد بازیابی‌شده ساخته شده‌است؛ و بدین‌وسیله منابع زمینی و انرژی حفظ‌شده درحالی که‌ضررهای محیطی‌کاهش یافته‌است، برای ساخت قطعات فلزی، شیشه، بتن، توفال‌سقف، کاغذ دیواری، عایق‌بندی، و محصولات چوبی از مواد بازیابی شده، لازم است از سطح بالای رشد و تکنولوژی مواد برخوردار بود تا قیمت و همچنین‌کیفیت آن با مواد معمول قابل رقابت باشد.




**شکل II** سیستم مواد برای تبدیل انرژی. طراحی هر نوع مجتمع مثل واکنشگر هسته‌ای آب‌جوش به شرکت ویژهٔ انواع مختلف مواد نیاز دارد. نقش، خواص و محدودیتهای هر ماده باید توسط دانشور یا مهندسی که می‌خواهد سیستم کارآمد، ایمن، با صرفه، و از نظر محیطی قابل اعتمادی طراحی کند، شناخته شود.

بنابراین می‌بینیم که علم ومهندسی مواد موضوع وسیعی است که از یك طرف به‌دنیای میکروسکوپی اتمها و الکترونها مربوط می‌شود و از طرف دیگر حالت جامد جسم را به دنیای ماکروسکوپی عمل و کاربرد مواد برای مقابله با مسائل اجتماعی مربوط می‌کند. نمودار دایره‌ای شکل IV بخش وسیعی از دانش بشری را ازعلوم پایه درمرکز، تا علوم کاربردی در دایرهٔ وسطی، تا زمینه‌های مختلف مهندسی در حاشیهٔ خارجی نشان می‌دهد. در مرکز فیزیك و شیمی را و درجناح آنها ریاضی و مکانیك را نشان داده‌ایم؛ با حرکت روی شعاع دایره به‌طرف خارج از مشخصه‌های کاربردی مختلفی می گذریم. قسمتی از این شکل که تحت‌عنوان علم و مهندسی مواد دیده می‌شود قطاع سایه‌زده شده‌ای درسمت‌راست

خرپاهای سقف از آلومینیم بازیابی‌شده

توفال پشت‌بام آسفالت از کاغذ و فیبر بازیابی‌شده

سطح پشت‌بام از کاغذ بازیابی‌شده

پشت‌بام آسفالت شده و دیوارهای نمدی از ضایعات جامد تغییر شکل‌یافته

زه‌کشی سقف و ناودانی ساخته شده از آلومینیم بازیابی‌شده چهارچوب

چهارچوب و میخها از آلومینیم بازیابی‌شده

پنجره‌ها از آلومینیم بازیابی‌شده

دیواره‌ها از آلومینیم بازیابی‌شده

چهارچوب درهای داخل از آلومینیم بازیابی‌شده

سرویس دستشویی از ضایعات سنگ مرمر

پوشش کف از ضایعات وینیل و چوب

آجر ساخته شده از خرده شیشه و ضایعات آجر

کابینها از چوب غیرتجاری و ضایعات چوب و خاک‌اره

کاشی کف از ضایعات وینیل و آلومین و بوکسیت

عایق از رشتهٔ بازیابی شده و سربارهٔ فولاد

زیر کف از کاغذ بازیابی شده

الوار کف از آلومینیم بازیابی‌شده

کاغذ دیواری از کاغذ بازیابی‌شده

کوبی از کاغذ بازیابی‌شده (ذره‌هایی از وینیل و کرباس به‌آن اضافه‌شده است)

چهارچوب در پاسیو ساخته شده از آلومینیم بازیابی‌شده

بلوک سنگ‌کاری‌شده ساخته‌شده از شیشه خرده

مجرایی از آلومینیم بازیابی‌شده

راه عبور ماشین ساخته شده از خرده‌شیشه و لاستیک ریزشده

چمن حاوی کود آلی به‌دست آمده از زباله

پرکنندهٔ ساخته‌شده از خرده شیشه

لوله‌های فاضلاب از چدن بازیابی شده

تختال بتنی حاوی خاکستر

لولهٔ آب از ضایعات پس بازیابی‌شده

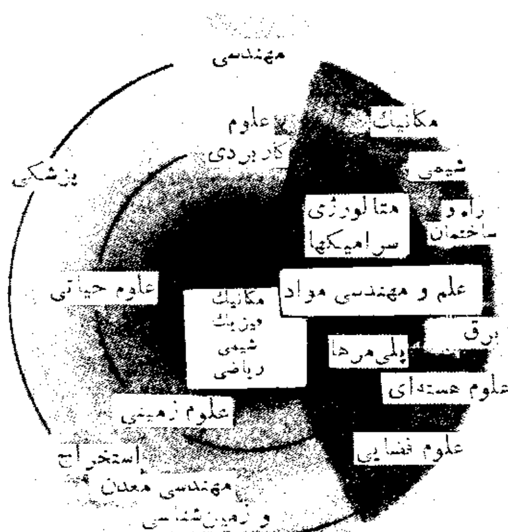
پاگرد بتنی ساخته شده از خاکستر

فرش از رشته‌های نایلونی بازیابی‌شده

**شکل III** مواد قابل استفاده مجدد، بازیابی بسیار مورد توجه است و هر روز تأکید بیشتری بر آن مبذول می‌شود. ولی در صورتی می‌توانند پاسخ خوبی برای مسائل محیطی و منابع ما باشد که مواد بازیابی شده بر اساس ظاهر، خواص، و کیفیت خدماتی با مواد دست‌نخورده قابل مقایسه باشند و قیمت آنها بیشتر نباشد. این نیازها رقابتهای فنی بسیاری را برای مهندسان پیش آورده است.

تصویر است که می‌توان آن‌را با قطاعهای دیگر که نشاندهنده علوم زیستی وعلوم زمینی‌اند مقایسه کرد. علم ومهندسی مواد به مفهوم وسیعتر آن است که نظامی مشتمل بر بعضی از نظامها (مثل متالورژی و سرامیك) و بعضی نظامهای فرعـی (مثل فیزیك حالت جامـد و شیمی پلی‌مرها) است (ولی جانشین آنها نمی‌شود) و همچنین با چندین نظام مهندسی همپوشانی دارد.

البته دانشوران و مهندسان بسیاری هستندکـه متخصص مواد، متالورژی، سرامیك و شیمی پلی‌مرند و کاملا در زمینهٔ علم مواد و مهندسی کار می‌کنند. نکتهٔ دیگری کـه دارای همین اهمیت است، این است که آمار دولتی پس‌از تجزیه و تحلیل نشان می‌دهند کـه یك ساعت از هرشش ساعت‌کار رسمی که توسط سایر مهندسان انجام می‌شود به مواد وکاربرد آنها مربوط است. نسبت زمانی بـرای شیمیدانان و فیزیکدانان حتی بیشتر از این است. در نتیجه معادل نیم‌میلیون از تقریباً دو میلیون دانشور و مهندس دراین کشور دراین بخش اصلی ازمحصولات ملی و آسایش ملی ما شریك‌اند.




**شکل IV.** علم و مهندسی مواد این نمودار ازاصول مقدماتی علمی فیزیك و شیمی ترسیم شده تـا ترکیب شیمیایی و ساختار مواد را به‌خواص و رفتارکاربردی کـه برای مهندسان اهمیت دارد مربوط سازد. بیش از یك چهارم فعالیتهای فنی ملی ما صرف گسترش و تکنولوژی مواد می‌شود. این فعالیتها در زمینهٔ علوم فیزیکی و تمام شاخه‌های مهندسی انجام می‌شود.

بدینسان علم و مهندسی مواد چهارچوبی را تشکیل می‌دهد که در آن افراد متخصص از بسیاری رشته‌ها به‌طور خلاق کار می‌کنند تا فرایندهای طبیعی را مورد بررسی دقیق‌قرار دهند و همچنین دانش خود را در زمینهٔ بر آوردن نیازهای بشری گسترش دهند.

**موریس کوهن**

کمبریج، ماساچوست
سپتامبر ۱۹۷۹

۱

# آشنایی با مواد: مشخصات مهم

## چشم‌انداز فصل

مهندس، مواد و انرژی را به‌محصولات قابل استفاده تبدیل می‌کند. او برای انجام این‌کار می‌کوشد موادی را با خواص بهینه برگزیند. در این فصل با تعدادی از خواص عامی کـه باید مورد نظر قرار گیرد آشنا می‌شوید. با خواص دیگر بعداً آشنا خواهید شد.

موضوع این کتاب، بستگی خـواص و رفتار مـواد به‌ساختار داخلی آنهاست. خواص مکانیکی، گرمایی، و الکتریکی ومشخصاتی که درفصل ۱ معرفی می‌شوند اساس تشریح ارتباط ساختار و خواص‌اند که درفصلهای بعدی به آنها می‌پردازیم. مطالبی نیز درمورد ارائهٔ داده‌ها، تغییرات آنها و دقتی که باید درمحاسبات منظور شود، به‌طور خلاصه درفصل ۱ آمده است.

## هدف از مطالعه

۱. آشنایی با این مفهوم که مواد دارای ساختار داخلی‌اند. (جزئیات مختلف ساختار داخلی موضوع اصلی فصلهای آینده خواهد بود.)

۲. آشنایی با واژه‌ها و مفاهیم برگزیده‌ای که الف) بعداً دراین کتاب و ب) درشغل آیندهٔ خود درحین ارتباط با سایر مهندسان با آنها برخورد خواهیدکرد.

۳. آموختن ارتباط بین خواص مکانیکی مختلف مواد، به‌ویژه آنهایی که در جدول ۱ـ۲ـ۱ وجود دارند.

۴. مرور درسهای قبلی فیزیك در زمینهٔ خواص کلیتر گرمایی و الکتریکی، و تعمیم مفهوم رسانندگی به‌حاملهای بار.

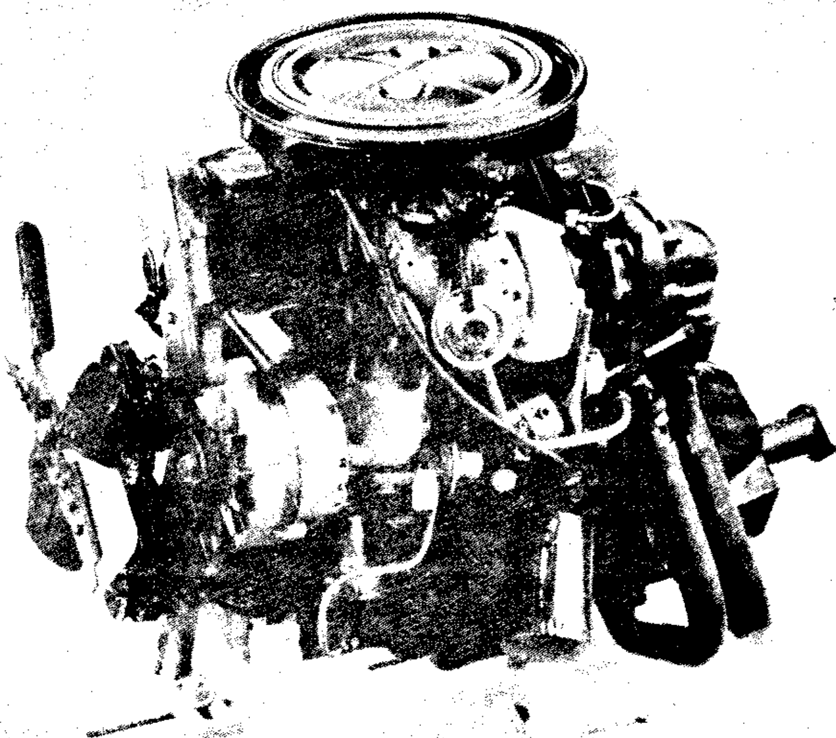
۵. مدلل کردن معلومات شما در مورد خواص با استفاده از محاسبات ساده. (مسائل موجود درپایان هر فصل بدین‌منظور آمده‌اند.)

۶. مرورمفاهیم میانگین، میانه، وانحراف استاندارد و ارائهٔ جوابها با تعداد مناسب ارقام بامعنی.

## ۱ـ۱ ساختارـخواصـانجام فرایند

هر دانشورز علوم کاربردی و هرمهندسی ازجمله مهندس مکانیك، عمران، و برق اساساً با مواد مصرفی در دسترس سروکار دارد. محصول کار او هرچه باشد از پل، کامپیوتر، سفینهٔ فضایی، دستگاه راه‌انداز قلب، واکنشگر هسته‌ای گرفته تا سیستم اتوماتیك اگزوز اتومبیل باید شناخت دقیقی از خواص و مشخصات رفتاری موادی که به‌کار می‌برد داشته باشد. لحظه‌ای تنوع موادی را که درساخت اتومبیل به‌کار می‌رود درنظر بگیرید، آهن، فولاد، شیشه، پلاستیك، و لاستیك شمار اندکی ازآنهاست (شکل ۱ـ۱ـ۱). فولاد به‌تنهایی در حدود دوهزارنوع و شکل‌مختلف دارد. انتخاب ماده برای‌قطعه‌ای معین برچه اساسی‌است؟

طراح برای انتخاب ماده باید خواصی مانند استحکام، رسانندگی الکتریکی یا گرمایی و چگالی‌را درنظر داشته باشد. علاوه براین باید چگونگی رفتار ماده را درخلال تولید و مصرف که شکل‌پذیری، قابلیت ماشینکاری، پایداری الکتریکی، دوام شیمیایی، و خواص تشعشعی اهمیت دارند و قیمت ودر دسترس بودن را نیز مد نظر قرار دهد. مثلا فولادی‌که در چرخ دنده‌های انتقال نیروی اتومبیل به‌کار می‌رود، باید در موقع تولید به‌آسانی ماشینکاری شود، ولی پس از آن باید به‌حد کافی چقرمه شود تا بتواند در مقابل کار و نیروی بسیار پایداری نشان دهد. سپر اتومبیل باید از فلزی ساخته شود که به‌آسانی شکل گیرد ولی درمقابل تغییرشکل ناشی از ضربه مقاوم باشد. سیمهای الکتریکی باید در برابر دمای بسیار زیاد دوام داشته باشند، و درنیمرساناها باید نسبت آمپر به‌ولتاژ مدتی طولانی ثابت بماند.



**شکل ۱-۱-۱** دراین موتور اتومبیل صدها نوع ماده به‌کار رفته است. (ازخواننده می‌خواهیم موادی را که واضح‌اند مشخص‌کند.) مهندس طراح، هرماده را براساس قابلیت ساخت، خواص، رفتار در حین کار، قیمت، و در دسترس بودن آن انتخاب می‌کند. در دهـهٔ آینده همگام بـا اهمیت یافتن محدودیتهای وزنی، مشکلتر بودن تهیهٔ مواد خام، و طراحی مجدد موتور بـرای تبدیل انرژی با بازدهٔ بیشتر و بهبود بخشیدن به‌مواد ضرورت می‌یابد.

بسیاری از طرحهای پیشرفته به‌تولید مواد کاملا جدید بستگی دارند. مثلا با موادی که تا چندسال پیش در دسترس بود ساخت ترانزیستور ممکن نبود. برای توسعهٔ لیزرها به‌انواع جدیدتری از بلور و شیشه نیاز بـود. با وجود پیشرفتهای زیادی کـه در طراحی موتورهای با توربین‌گازی حاصل شده، برای ساختن پره‌های این نوع توربینها هنوز در پی مادهٔ ارزان‌قیمتی هستیم که بتواند دماهای بالا را تحمل‌کند.

**ساختار داخلی وخواص.** چون عملا هیچ‌مهندس یا دانشورزی نمی‌تواند شناخت دقیقی از هزاران مادهٔ موجود و همچنین‌کشفیات جدید داشته باشد، باید از اصول اساسی حاکم برخواص تمام مواد شناخت کافی داشته باشد. اصلی‌که برای‌مهندسان و دانشورزان‌اهمیت

فراوان دارد این است که خواص یک ماده از ساختار داخلی آن ناشی می‌شود. درست مثل این است که بگوییم کار هر دستگاه تلویزیون یا هر محصول الکترونیکی دیگر (شکل ۱-۱-۲) به‌اجزاء و قطعات و مدارهای داخل آن دستگاه بستگی دارد. هرکسی می‌تواند با کمك کلید قطع و وصل، تلویزیون را روشن کند. ولی تکنیسین الکترونیك اگر بخواهد آن را درست تعمیر کند باید مدارهای داخلی آن را بشناسد و فیزیکدان یا مهندس برق برای طرح یا بهبود بخشیدن به‌محصول نهایی باید مشخصات هرکدام از قطعات مدارهای داخلی تلویزیون را بداند.



**شکل ۱-۱-۲** ماشین حساب الکترونیکی. چگونگی کار ماشین حساب به‌ترتیب اجزای مدار داخلی آن بستگی دارد. به‌همین ترتیب رفتار مواد به‌ساختار اجزای داخلی مربوط می‌شود. خواهیم دیدکه این ترتیب شامل ساختار الکترونی اطراف اتمها، آرایش اتمی، ساختار بلورها و میکرو ساختار بلورهای مجاور است. مهندسان و دانشورزان می‌توانند با انتخاب این ساختارهای داخلی و بهبود بخشیدن به‌آنها نیازهای طراحی‌را برطرف سازند؛ درست همان‌طور که طراح مدار اجزای الکتریکی آن را اصلاح می‌کند. برای انجام هوشمندانهٔ این‌کار، باید ارتباط بین ساختار و خواص مواد را بدانیم.

ساختار داخلی مواد شامل اتمها و چگونگی ارتباط آنها با اتمهای همسایه در بلورها، مولکولها و میکروساختار آنها می‌شود. در فصلهای بعد به‌این ساختارها توجه زیادی خواهیم کرد، زیرا هر کسی که با مسائل فنی سروکار داشته باشد، برای تولید و مصرف مواد باید این ساختارها را دقیقاً درک کند، درست مثل اینکه هرمهندس مکانیکی که می‌خواهد برای نیازهای ده‌سال بعد اتومبیلی طراحی کند، یا طرحهای موجود را توسعه دهد، باید عملکرد موتور احتراق داخلی را بداند.

**انجام فرایند وخواص.** مواد باید فرایندهایی را پشت سر گذارند تا مشخصاتی را که مهندس برای‌محصول مورد طراحی درنظر دارد، به‌دست آورند. معمولیترین مراحل فرایند، مثل ماشینکاری یا پتک‌کاری، به‌سادگی شکل مواد را تغییر می‌دهند. البته خواص در تسهیل انجام فرایند نقش‌مهمی دارند. مواد فوق‌العاده سخت فوراً تیغه‌های ابزار برش را خراب می‌کنند و مواد نرم مانند سرب ممکن است موجب «کج رفتن» تیغه‌های اره، چرخهای سنگ‌زنی و سایر ابزار شوند. به‌همین ترتیب مواد محکم، به‌ویژه اگر انعطاف‌پذیرنباشند یعنی ترد باشند، تابع تغییرشکل پلاستیکی نیستند، مثلا تولید ورق فلزی لازم برای سپر اتومبیلها با ماده‌ای به‌جز نرمترین فولاد فوق‌العاده گران تمام می‌شود.

فرایندهایی که انجام می‌شود معمولا فراتر از تغییر دادن شکل مواد با ماشینکاری یا با تغییرشکل پلاستیکی است. فرایند ساخت، اغلب خواص ماده را تغییر می‌دهد. مثلا سیم اگر برای کاهش قطر از میان قالب کشیده شود، محکم و سخت می‌شود. به‌طورکلی این سخت شدن در سیم مسی‌ که به‌عنوان رسانای برق مصرف می‌شود مطلوب نیست؛ برعکس درمورد سیم فولادیی که در لاستیك تقویت‌شده با سیمهای فولادی به‌کار می‌رود، مهندس روی این استحکام به‌وجود آمده در حین انجام فرایند حساب می‌کند. خواه ناخواه هرجا که فرایند ساخت، ساختار داخلی ماده را تغییر دهد باید انتظار تغییر خواص را داشت. هنگامی که ماده تغییرشکل می‌دهد ساختار داخلی آن تغییر می‌کند؛ و بنابراین تغییری در خواص به‌وجود می‌آید.

فرایندهای گرمایی نیز ممکن است ساختار داخلی مواد را تحت تأثیر قرار دهند. این فرایندها شامل تابکاری، آب دادن مواد از دماهای بالا، و چند عملیات گرمایی دیگر است. منظور ما درك ماهیت تغییرات ساختاری است، تا به‌عنوان مهندس بتوانیم مراحل مناسب فرایند را مشخص کنیم.

**رفتارماده درحین‌کار.** ماده‌ای که به‌صورت محصول نهایی درمی‌آید دارای مجموعه‌ای از خواص نظیر استحکام، سختی، رسانندگی، چگالی، رنگ و غیره است که طبق نیاز انتخاب می‌شود. ماده این‌خواص را همیشه درخود دارد. مشروط براینکه تغییری درساختار داخلی آن به‌وجود نیاید، ولی اگر محصول درحین‌کار با شرایطی روبه‌رو شود که ساختار داخلی را تغییردهد، مطابق با آن باید انتظارتغییر درخواص و رفتار ماده را داشته‌باشیم.

این امر نشان می‌دهدکه چرا لاستیك درمعرض نور و هوا به‌تدریج سخت می‌شود؛ چرا در بسیاری از قسمتهای هواپیمای مافوق صوت نمی‌توان آلومینیم به‌کار برد؛ چرا فلز تحت بار چرخه‌ای خسته می‌شود؛ چرا مته‌ای از جنس فولاد معمولی نمی‌تواند به‌سرعت مته‌ای ازفولاد تندبر سوراخ کند؛ چرا آهنربا قطبی بودن خود را درمیدان *rf* از دست می‌دهد و چرا نیمرسانا براثر تشعشع هسته‌ای ممکن است صدمه ببیند. این موارد پایان ندارد. در نتیجه مهندسان باید علاوه بر خواستهٔ اولیه به شرایط کاری که ساختار داخلی و در نتیجه خواص مواد را تغییر می‌دهند نیز توجه کنند.

**سیرمطالب‌این‌کتاب.** طبق «ساختار» طرح‌شده برای این کتاب فصل اول در بارهٔ برخی اصلاحات و اندازه‌گیری خواص مواد بحث می‌کند. سپس در فصل ۲ آن دسته از مبانی علم شیمی و فیزیك مقدماتی را که مستقیماً به‌رابطهٔ بین ساختار و خواص مربوط می‌شود مرور می‌کنیم. ازفصل سوم به‌بعد به‌ترتیب صور مختلف ساختاری را که خواص به‌آنها بستگی دارد (از اتم گرفته تا مواد چند سازه) بررسی‌خواهیم کرد. نقش فرایندها و عوامل مربوط به‌کاربرد را اغلب در نظر خواهیم گرفت، زیرا همیشه در تصمیم گیری در مورد طرح باید مورد توجه قرار گیرند.

مسائل نمونه و مسائل آخر فصل به‌دومنظور به‌کار رفته‌اند: ۱) تشریح اصول مربوط به‌ساختار و یا خواص؛ ۲) افزایش توانایی حل مسئله که برای مهندسان و کارشناسان‌علوم کاربردی بسیار اهمیت دارد.

## ۱ـ۲ رفتار مکانیکی

اگر نیرویی برماده اعمال شود، تغییرشکلی درآن صورت می‌گیرد. مقدار تغییرشکل در واحد طول را کرنش، $e$، و مقدار نیرو بر واحد سطح را تنش، $s$، می‌نامند. در حین تغییر شکل، ماده انرژی جذب می‌کند زیرا در خلال تغییر شکل نیرویی اعمال می‌شود. استحکام، مقدار تنش لازم برای شکست ماده را نشان می‌دهد. انعطاف‌پذیری مقدارکرنش دائمی قبل از شکست را مشخص می‌کند، در حالی که چقرمگی به‌مقدار انرژی جذب شده توسط ماده درخلال شکست گفته می‌شود (جدول ۱ـ۲ـ۱).

مهندس طراح مشخصات مختلفی برای این خواص مکانیکی تعیین می‌کند. برای مثال در فولاد خط لوله، عموماً استحکام زیاد را توصیه می‌کنند. همچنین برای افزایش چقرمگی ممکن است انعطاف‌پذیری زیاد توصیه شود. از آنجا که این دو عامل (استحکام و انعطاف‌پذیری) باهم سازگار نیستند، مهندسان اغلب باید حالت بینابین این دو را درنظر گیرند تا مشخصات بهینه را به‌دست آورند. استحکام و انعطاف‌پذیری نیز به راههای‌مختلفی تعریف می‌شوند. مثلا آیا وقتی میله‌ای فولادی خم می‌شود دیگر قابل‌استفاده نیست یا میله باید واقعاً بشکند تا قابل‌استفاده نباشد؟

البته جواب این سؤال به‌نیاز طرح مهندسی بستگی دارد ولی این تضاد، سودمندی تعریف حداقل دو استحکام را به ما نشان می‌دهد: یکی برای تسلیم شدن اولیه و دیگری برای بیشینهٔ باری که ماده می‌تواند تحمل کند. به‌این منظور در اینجا نمودارهای تنش - کرنش ($s$ - $e$) شکل ۱-۲-۱ را بررسی می‌کنیم و در خلال آن به‌ترتیب تغییرشکل، استحکام، سختی و چقرمگی را مدنظر قرار خواهیم داد.

**تغییر شکل.** کرنش اولیه اصولاً با تنش متناسب است، به‌علاوه این کرنش برگشت‌پذیر است. پس از برداشتن تنش، کرنش نیز از بین می‌رود. مدول کشسانی (مدول یانگ) برابر نسبت تنش $s$ به‌این کرنش برگشت‌پذیر $e$ است

$$E = s/e \qquad (۱-۲-۱)$$

مطابق جدول ۱-۲-۱، واحد مدول یانگ $E$ در سیستم متریک، پاسکال (یا معمولیتر از آن مگا پاسکال MPa) است. در پیوست (ج) مقادیر مدول یانگ برای مواد برگزیده‌ای آورده شده است. در فصل ۲ خواهیم دید که مدول کشسانی (مدول یانگ) مقیاسی از نیروهای پیوند بین اتمی است. مهندس باید کاملاً این خواص را بشناسد زیرا مستقیماً به‌صلابت محصول مهندسی حاصل مربوط است.

در تنشهای بالاتر علاوه بر کرنش کشسان، بین اتمهای داخل ماده تغییر مکانی دائمی نیز رخ می‌دهد. اگر تنش اعمال‌شده را برداریم، این کرنش دائمی قابل برگشت نیست؛ این کرنش را کرنش پلاستیکی می‌نامیم. وجود این نوع کرنش در خلال انجام فرایندهایی روی مواد (مثلاً در نوردکردن ورقهای آلومینیم ابتدا به‌ورقهای نازکتر و سپس به‌ورقهای خیلی نازک) ضروری است. کاربرد این محصولات معمولاً طوری طرحریزی می‌شود که از تغییر شکل دائمی محصول پرهیز شود و بنابراین تنشهایی که در طراحی در نظر گرفته می‌شوند باید درمحدودهٔ کشسان (خطی) شکل ۱-۲-۱ (ب) و (ج) باشند.

کرنش کشسان که تنها حالت تغییر شکل زیر استحکام تسلیم است در تنشهای بالاتر که کرنش پلاستیکی به‌وجود می‌آورند نیز به‌افزایش خود ادامه می‌دهد. هنگامی که ماده می‌شکند (یا بار به‌سادگی از روی آن برداشته می‌شود) کرنش کشسان از بین می‌رود ولی کرنش پلاستیکی از بین نمی‌رود.

انعطاف‌پذیری، یا کرنش پلاستیکی لازم برای شکست، $e_f$، را می‌توان به‌صورت درصد ازدیاد طول بیان کرد. انعطاف‌پذیری نیز مانند کرنش بدون واحد و به‌صورت $(L_f - L_o)/L_o$ یا $\Delta L/L_o$ است. اما از شکل ۱-۲-۲ مشخص می‌شود که چون تغییر طول معمولاً در ناحیهٔ گلویی نمونه متمرکز می‌شود، بنابراین مقدار ازدیاد طول به سنجهٔ طول بستگی دارد. هرجا که بخواهیم ازدیاد طول را گزارش دهیم باید سنجه طول را مشخص کنیم.

مقیاس دوم انعطاف‌پذیری، کاهش سطح مقطع $(A_o - A_f)/A_o$ در نقطهٔ شکست

**جدول ۱-۲-۱ خواص مکانیکی مواد**

| خواص | علامت | تعریف (یا توضیحات) | واحد معمول / SI |
|---|---|---|---|
| تنش | $s$ | نیرو / سطح واحد $(F/A)$ | پاسکال $(N^*/m^2)$ |
| کرنش | $e$ | تغییرشکل نسبی $(\Delta L/L)$ | — |
| مدول کشسانی (یانگ) | $E$ | تنش / کرنش کشسان | پاسکال |
| استحکام | | تنش در لحظهٔ گسیختگی | |
| استحکام تسلیم | $S_y$ | مقاومت درمقابل تغییرشکل پلاستیکی اولیه | پاسکال |
| استحکام کششی | $S_t$ | بیشینهٔ استحکام (براساس ابعاد اولیه) | پاسکال |
| انعطاف‌پذیری | | کرنش پلاستیکی در لحظهٔ گسیختگی | — |
| ازدیاد طول | $e_f$ | $(L_f - L_0)/L_0$ | § |
| کاهش سطح مقطع | R از A | $(A_0 - A_f)/A_0$ | § |
| چقرمگی | | انرژی لازم برای گسیختگی توسط شکست | ژول |
| سختی** | | مقاومت درمقابل فرورفتگی پلاستیکی | واحدهای مختلف |

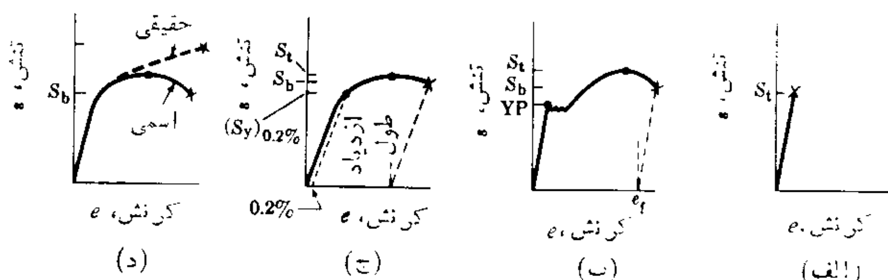
* باری به‌جرم یک کیلوگرم تحت‌تأثیر شتاب ثقل نیروی $F$ را ایجاد می‌کند که برابر ۹٫۸ نیوتن است.

** برای تعیین مقدار سختی معمولا سه‌روش مختلف به‌کار می‌رود:

برینل (BHN): در این روش ازسمبهٔ بزرگی استفاده می‌شود، و سختی به‌قطر سمبه (۱ تا ۴ میلی‌متر) بستگی دارد.

راکول (R): در این‌روش ازسمبهٔ کوچکی استفاده می‌شود، و سختی به‌عمق حفرهٔ ایجادشده بستگی‌دارد. براساس‌اندازهٔ سمبه و بار اعمال شده چندمقیاس مختلف راکول حاصل می‌شود.

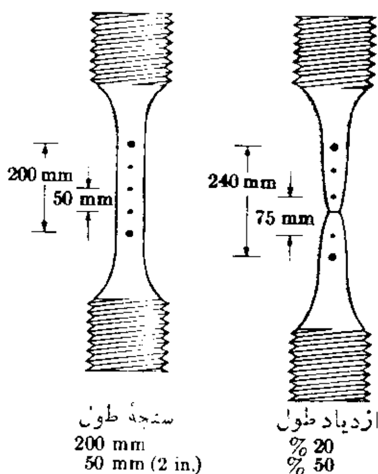
ویکرز (DPH): دراین روش منشور الماسی کوچکی به‌کار می‌رود، و می‌توان ازبار بسیارسبکی برای اندازه‌گیری سختی در زیرمیکروسکوپ، استفاده کرد.




**شکل ۱-۲-۱** نمودارهای تنش - کرنش. الف) مادهٔ انعطاف‌ناپذیر بدون‌هیچ‌گونه تغییرشکل پلاستیکی (مثلاً چـدن)؛ ب) مادهٔ انعطاف‌پذیر دارای نقطهٔ تسلیم (مثلاً فولاد کم کربن)؛ ج) مادهٔ انعطاف‌پذیر بـدون نقطهٔ تسلیم مشخص (مثلاً آلومینیم)؛ د) منحنی تنش - کرنش حقیقی در مقایسه با منحنی تنش - کرنش اسمی. $S_b$ = استحکام شکست؛ $S_t$ = استحکام کششی؛ $S_y$ = استحکام تسلیم؛ $e_f$ = ازدیاد طول (کرنش قبل‌ازشکست)؛ X = شکست؛ YP = نقطهٔ تسلیم.

است. سطح مقطع مـواد خیلی انعطاف‌پذیر قبل‌از شکستن مقدار زیـادی کاهش مـی‌یابد ازدیاد طـول اندازهٔ «کشش» پلاستیکی است، درصورتی کـه کاهش سطح مقطع اندازهٔ «انقباض» پلاستیکی‌است. بسیاری ازمهندسان‌ترجیح می‌دهند کاهش‌سطح مقطع را به‌عنوان






(الف) (ب)

**شکل ۱-۲-۲** آزمایش کششی. الف) آزمایش‌کامل روی‌نمونهٔ مدور؛ ب) ازدیادطول برحسب سنجهٔ‌طول. چون تغییرشکل نهایی متمرکزاست، بدون تعیین سنجهٔ طول، مقدار ازدیادطول بی‌معنی‌است. برای آزمایشهای‌معمولی، ازسنجهٔ طول ۵۰ میلی‌متری استفاده می‌شود.

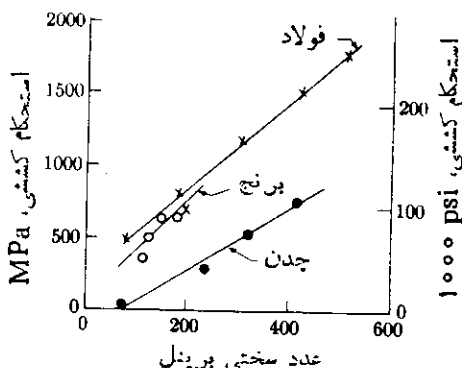
مقیاس انعطاف‌پذیری به‌کار برند، زیرا به‌سنجهٔ‌طول نیاز ندارد و برای تعیین کرنش حقیقی درنقطهٔ شکست نیز مـی‌توان آن را به‌کار برد. (توضیح بعداز مثال ۱ـ۲ـ۴ را ببینید.) بین ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع نمی‌توان رابطهٔ دقیقی برقرار کرد، زیرا تغییرشکل پلاستیکی ممکن‌است به‌شدت موضعی باشد. البته مواد بسیار انعطاف‌پذیر تغییر طول وکاهش سطح مقطع زیادی خواهند داشت و مقدار این دو در مواد انعطاف‌ناپذیر نزدیك به صفر خواهد بود.

**استحکام(وسختی).** مقاومت هرماده را درمقابل تغییرشکل‌پلاستیکی، استحکام تسلیم، $S_y$، می‌نامند که از تقسیم نیرو درلحظهٔ شروع تسلیم به‌سطح مقطع آن به‌دست می‌آید، درموادی مانند بعضی فولادهای نرمتر، استحکام‌تسلیم را می‌توان به‌صورت نقطهٔ تسلیم مشخصی نشان داد [شکل ۱ـ۲ـ۱ (ب)]. درسایر موادی‌که در آنها حدخطی کمتر مشخص است، معمولاً استحکام تسلیم را به‌صورت تنشی کـه ۲ر۰ درصد (یـا مقدار قابل‌تغییر دیگری) افست پلاستیکی ایجاد کند [شکل ۱ـ۲ـ۱ (ج)]، تعریف می‌کنند.

استحکام کششی ($S_t$) ماده، ازتقسیم بیشینهٔ بار به‌سطح‌مقطع اولیهٔ آن به‌دست‌می‌آید. واحد این استحکام نیز مانند سایر استحکامها همان واحد تنش است. به‌ویژه باید توجه‌کرد کـه استحکام کششی براساس سطح مقطع اولیه محاسبه می‌شود. این‌مطلب بسیار مهم است زیرا سطح مقطع مادهٔ انعطاف‌پذیر تحت باربیشینه تااندازه‌ای کم می‌شود.

در جدول ۱ـ۲ـ۱ استحکام به‌صورت تنشی که موجب شکست می‌شود تعریف شده است. ولی می‌بینید که شکست، خود باید تعریف شود. فولادی کـه به‌شکل آهن‌نبشی در برج آنتن رادیو بـه‌کار می‌رود اگر در حین کار خم شود می‌شکند و ممکن است موجب فروریختن برج شود. ازآنجاکه خمش‌موجب‌تغییرشکل پلاستیکی می‌شود،ساختار قسمتهای مختلف برج طوری طراحی می‌شود که تنشها را پایینتر از استحکام تسلیم، $S_y$، آهن نبشی نگه دارد. ولی‌درساخت سیم‌مهار برای‌برج آنتن‌رادیو لازم‌است که سیم باکشیده‌شدن‌ازمیان یك قالب، تغییر شکل پلاستیکی یابد. این تغییرشکل پلاستیکی حتی اگر تنش از استحکام تسلیم بیشتر باشد، موجب شکست نمی‌شود. آنچه‌که وارد محاسبات طراحی می‌شود بیشینهٔ باری است‌که سیم می‌تواند بدون شکست تحمل‌کند. بـاتقسیم استحکام‌کششی $S_t$، به‌بیشینهٔ نیروی پیش‌بینی شده، می‌تـوان ابعاد سطح مقطع لازم برای جلوگیری ازشکستن سیم را به‌دست‌آورد، این‌ابعادباید برابر ابعادطرح‌اولیهٔ قبل‌از هرنوع تغییرشکل پلاستیکی‌باشند.

درصورت لزوم می‌توان تنش حقیقی، $\sigma$، را که عبارت است ازنیرو تقسیم برسطح واقعی، محاسبه‌کرد. البته این‌مقدار درطول‌نمونهٔ آزمایشی‌تحت تغییرشکل پلاستیکی تغییر می‌کند، و در ناحیهٔ گلویی بیشترین مقدار را دارد (شکل ۱ـ۲ـ۲). یعنی تنش حقیقی $\sigma_f$ برای شکست همیشه از استحکام شکست $S_b$ کـه به‌سطح اولیه بستگی دارد، بیشتر است. (شکلهای ۱ـ۲ـ۱ (ج) و ۱ـ۲ـ۱ (د) را ببینید.) تنش حقیقی، تحلیل نیروهـای واقعی را در حین تغییرشکل و شکست میسرمی‌سازد؛ ولی تنش اسمی (کـه براساس سطح‌اولیه



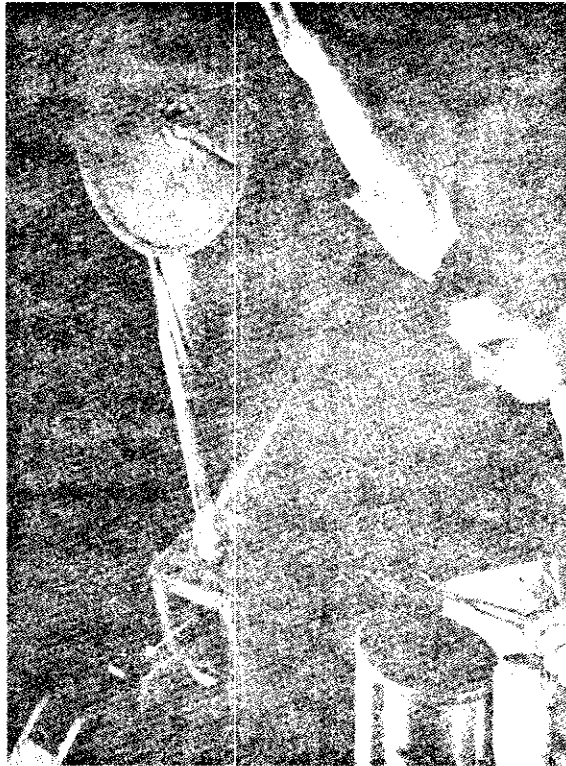

**شکل ۱-۲-۳** منحنی استحکام کششی برحسب عدد سختی برینل (BHN) برای فولاد، برنج، و چدن.

است) برای مهندسان که طبیعتاً باید طرحهای خود را براساس ابعاد اولیه ایجاد کنند اهمیت بیشتری دارد.

بنا به تعریف، سختی مقاومت ماده درمقابل فرورفتگی سطح آن است. چنانکه انتظار می‌رود سختی و استحکام هرمــاده مطابق شکل ۱-۲-۳ دقیقاً به‌هم مربوط‌اند. عدد سختی برینل (BHN) شاخص سختی است کــه با اندازه‌گیری سطح فرورفتگی حاصل از سمبهٔ بزرگی محاسبه‌می‌شود. این فرورفتگی به‌وسیلهٔ گویی ازجنس فولاد بسیار سخت یا تنگستن کاربید و تحت بار استانداردی ایجادمی‌شود. یکی دیگر ازشاخصهای معمول و مورداستفادهٔ مهندسان برای اندازه‌گیری سختی، سختی‌راکول (R) است که به‌سختی برینل ارتباط دارد ولی با اندازه‌گیری عمق فرورفتگی حاصل از یك سمبهٔ کوچك استاندارد به‌دست می‌آید. با انتخاب شکلهای متعدد سمبه‌هــا و بارهــای مختلف، چندین مقیاس برای سختی راکول به‌دست می‌آیدکه برای موادی باسختیهای متفاوت به‌کار می‌روند.

**چقرمگی.** چقرمگی مقدار انرژی‌لازم برای شکستن ماده است (شکل ۱-۲-۴). این تعریف با تعریف استحکام که مقدار تنش لازم برای تغییر شکل یا شکستن ماده است تفاوت دارد. انرژی کــه حاصل‌ضرب نیرو درفاصله است برحسب ژول بیان می‌شود؛ این انرژی کاملا به‌سطح زیر منحنی تنش ـ کرنش وابسته است. مادهٔ انعطاف‌پذیری که ازنظر استحکام شبیه مــاده‌ای غیرانعطاف‌پــذیر است، برای شکسته شدن انرژی بیشتری لازم دارد و بنابراین چقرمه‌تر است. آزمایشهای استاندارد شارپی[1] یا آیزد[2] دو تــا از روشهای به‌کار رفته در اندازه‌گیری چقرمگی موادند. این دونوع آزمایش ازنظر شکل نمونهٔ آزمــایشی و روش اعمال انرژی با هم اختلاف دارند. چون چقرمگی به‌هندسهٔ تمرکز تنش نیز بستگی دارد،

1. Charpy  2. Izod



**شکل ۱-۲-۴** آزمایش چقرمگی. نمونهٔ آزمایش (که باپیکان‌مشخص‌شده) دراثر ضربهٔ پاندول متحرك شکسته می‌شود. مقدار انرژی جذب شده را می‌توان با بدست آوردن قوسی که پاندول طی‌کرده محاسبه کرد.

مشخص‌کردن طریقهٔ انجام آزمایش مورد استفاده از اهمیت خاصی برخوردار است.

**مثال ۱-۲-۱** کدامیك از قطعات زیر تنش بیشتری دارد؟ الف) میله‌ای آلومینیمی باسطح مقطع ۲۴٫۶ mm × ۳۰٫۷ mm تحت‌بار ۷۶۴۰ kg و درنتیجه‌نیروی ۷۵۰۰۰ N، یا ب) میله‌ای فولادی باسطح مقطعی به‌قطر ۱۲٫۸ mm تحت‌بار ۵۰۰۰ kg.

حل:

واحدها : $\frac{\text{نیوتن}}{(\text{m})(\text{m})}$ = پاسکال

محاسبات:

(الف) $\dfrac{(۷۶۴۰)(۹٫۸)}{(۰٫۰۲۴۶)(۰٫۰۳۰۷)} = ۱۰۰\ \text{MPa}$

(ب) $\dfrac{(۵۰۰۰)(۹٫۸)}{(\pi/۴)(۰٫۰۱۲۸)^۲} = ۳۸۰\ \text{MPa}$

**توضیح.** یادآور می‌شود که $(\text{kg})(۹٫۸\ \text{m/s}^۲) = ma =$ نیوتن. ▲

**مثال ۱-۲-۲** یك سنجهٔ طـول ۵۰ میلی‌متری روی یك‌میلهٔ مسی علامتگذاری شده است، میله آنقدر کشیده شده است که علامتهای پیشگفته به‌فاصلهٔ ۵۹ mm ازهم قرار گرفته‌اند، کرنش حاصل را محاسبه کنید.

حل:

واحدها: $\dfrac{(\text{mm}-\text{mm})}{\text{mm}} = \dfrac{\text{mm}}{\text{mm}} = \dfrac{\text{درصد}}{۱۰۰}$

محاسبات: $\dfrac{۵۹-۵۰}{۵۰} = ۰٫۱۸\ \text{mm/mm}$ (یا ٪۱۸)

**توضیح.** اندازه‌گیری برحسب اینچ نیز همین نتیجه را خواهد داد. ▲

**مثال ۱-۲-۳** اگر مدول کشسانی متوسط فولاد برابر ۲۰۵۰۰۰ MPa باشد درآن‌صورت سیمی‌فولادی به‌قطر ۲٫۵ میلی‌متر و طول ۳متر تحت‌بار ۵۰۰ کیلوگرم (۴۹۰۰ $N$) چقدر کشیده خواهد شد؟

حل: مدول کشسانی $E$ برابراست با $\dfrac{\text{تنش}}{\text{کرنش}}$، یا

$$\text{کرنش} = \frac{s}{E}$$

واحدها: $\dfrac{\text{m}}{\text{m}} = \dfrac{\text{N/m}^۲}{\text{پاسکال}}$

محاسبات: $\text{کرنش} = \dfrac{۴۹۰۰/(\pi/۴)(۰٫۰۰۲۵)^۲}{۲۰۵۰۰۰ \times ۱۰^۶} = ۰٫۰۰۵\ \text{m/m}$

$$\text{کشیدگی} = (۰٫۰۰۵\ \text{m/m})(۳\ \text{m}) = ۱۵\ \text{mm}$$

▲

□ **مثال ۱-۲-۴*** سیمی مسی دارای استحکام اسمی شکست ۳۰۰ MPa و کاهش سطح مقطع ٪۷۷ است. تنش حقیقی شکست $\sigma_f$ را محاسبه کنید.

حل: براساس سطح مقطع اولیه، $A_0$،

$$F=(۳۰۰\times ۱۰^{۶}\mathrm{N/m^{۲}})A_0 ؛ \frac{F}{A_0}=۳۰۰\,\mathrm{MPa}$$

$$\sigma_f=\frac{F}{A_{tr}}=\frac{F}{(۱-۰٫۷۷)A_0}=\frac{(۳۰۰\times ۱۰^{۶}\,\mathrm{N/m^{۲}})A_0}{۰٫۲۳\,A_0}=۱۳۰۰\,\mathrm{MPa}$$

$$\frac{F}{A_{tr}}=\frac{(۴۳۰۰۰\ \mathrm{psi})\,A_0}{۰٫۲۳A_0}=۱۸۷۰۰۰\mathrm{psi}.$$

توضیح. کرنش حقیقی $\epsilon$ را می‌توان از ابعاد سطح مقطع معین کرد. اگر کرنش حقیقی $\epsilon$ را به‌صورت

$$\epsilon=\int_{l_0}^{l}\frac{dl}{l}=\ln\left(\frac{l}{l_0}\right)$$

تعریف و فرض کنیم که حجم ثابت است، یعنی $Al=A_0l_0$، داریم

$$\epsilon=\ln\left(\frac{l}{l_0}\right)=\ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \qquad (۲-۲-۱)$$ □

این رابطه تعریفی است از کرنش واقعی که برای تمام کرنشها صادق است و به‌سنجهٔ طول بستگی ندارد. ▲

## ۱-۳ مشخصات گرمایی

**ظرفیت گرمایی.** ازدید مهندسان و دانشورزان تفاوت بین‌دما و درون‌گرمی (آنتالپی) ماده اهمیت زیادی دارد. دما میزان فعالیت گرمایی جسم را نشان می‌دهد، درحالی که درون‌گرمی، انرژی گرمایی ماده است. این دو از طریق ظرفیت گرمایی به‌هم مربوط می‌شوند.

در صورتی که حجم تغییر نکند، ظرفیت گرمایی $c$، میزان تغییر درون‌گرمی را در هردرجهٔ سانتی‌گراد نشان‌می‌دهد. جدولهای فنی گاه گرمای ویژه را به‌جای ظرفیت گرمایی

---

* مثالهایی‌را که با مربع توخالی، □، مشخص‌شده‌اند به‌تشخیص مدرس‌می‌توان حذف کرد (به مقدمهٔ مؤلف مراجعه کنید).

به‌کار می‌برند. بنا به‌تعریف، گرمای ویژه هرماده نسبت ظرفیت گرمایی آن ماده به‌ظرفیت گرمایی آب است. بنابراین از آنجا کـه ظرفیت گرمایی آب معادل $1\ cal/g^\circ C$ است محاسبات مربوط به‌گرما را می‌توان در سیستم دلخواه واحدها انجام داد.

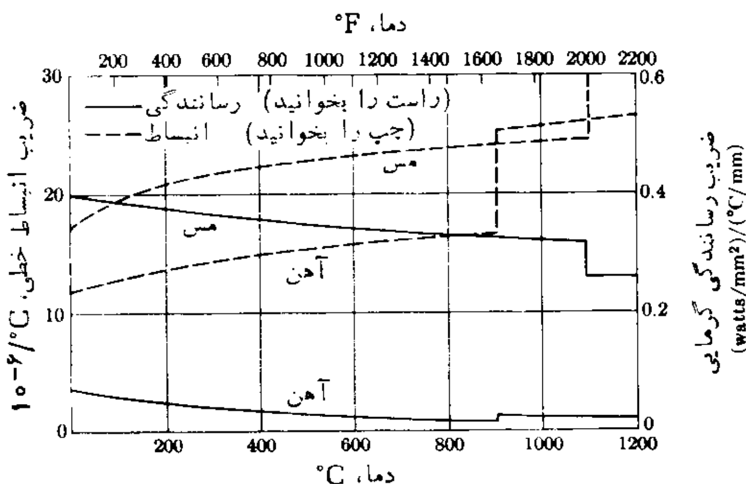
انواع مختلف گرمای تبدیل در مـواد اهمیت دارد. مشهورترین آنها گرمای ذوب وگرمای تبخیرندکه به‌ترتیب عبارت‌اند از گرمای لازم برای ذوب و بخارشدن؛ و درواقع هریك موجب تغییر ماده از یك ساختار اتمی یا مولکولی به‌ساختار دیگر مـی‌شوند. بعداً خواهیم آموخت که تغییرات ساختاری مختلفی ممکن است درون جامدات به‌وجود آید و این تغییرات نیز مستلزم تغییر گرما یا انرژی گرمایی درونی ماده است.

**انبساط گرمایی.** انبساطی که معمولا درخلال گرمایش ماده تولید می‌شود ناشی ازارتعاشات گرمایی شدیدتر اتمهای آن ماده است. به‌عنوان اولین تقریب، افزایش طول $\Delta L/L$ ماده با تغییر دمای، $\Delta T$، متناسب است، یعنی

$$\Delta L/L = \alpha_L \Delta T \qquad (۱-۳-۱)$$

آزمایشهای دقیقتر نشان می‌دهد که ضریب انبساط طولی، $\alpha_L$، معمولا با ازدیاد دما اندکی افزایش می‌یابد (شکل ۱-۳-۱). داده‌هـای مربوط به‌انبساط گرمایی در دمـای $20\ ^\circ C$ ($68\ ^\circ F$) درپیوست (ج) آمده است.

ضریب انبساط حجمی، $\alpha_V$ رابطه‌ای‌شبیه معادلهٔ (۱-۳-۱) بین تغییر حجم، $\Delta V/V$ و تغییر دما، $\Delta T$ برقرار می‌کند. $\alpha_V$ همواره سه‌برابر مقدار $\alpha_L$ است [مسئلهٔ ۱-۳-۳ (ب)




**شکل ۱-۳-۱** تغییرات خواص گرمایی بـرحسب دما. ناپیوستگی منحنی مـربوط به‌مس در $1084{,}5\ ^\circ C$ ($1984\ ^\circ F$) ناشی از ذوب است. آهن بـه علت نـوآرایی اتمها در $912\ ^\circ C$ ($1673\ ^\circ F$) یك‌چنین ناپیوستگیی در منحنی نشان می‌دهد (فصل ۳ را ببینید).

را ببینید].*

ناپیوستگیهای موجود درضرایب انبساط شکل ۱ـ۳ـ۱ ناشی از تغییر آرایش اتمی در داخل ماده است. مس دقیقاً در $1082\,^\circ C$ ($1984\,^\circ F$) ذوب می‌شود. زیر $912\,^\circ C$ ($1673\,^\circ F$) اتم آهن هشت اتم همسایه دارد، بالای این دما اتمها نوآرایی مـی‌یابند و به‌صورتی در می‌آیند که در آن هر اتم دوازده اتم همسایه دارد. چون این نوع تغییرات ساختاری بر بسیاری ازخواص مهندسی مواد اثر می‌گذارد، درفصلهای بعد آرایشهای اتمی را بررسی خواهیم کرد.

**رسانندگی گرمایی.** انتقال گرمادرجامدات اغلب ازطریق رسانش انجام می‌شود. رسانندگی گرمایی، $k$، ضریب تناسب ثابتی است که شارگرمایی $\mathbf{Q}$ و گرادیان گرمایی $\Delta T/\Delta x$ را به‌هم مربوط می‌کند

$$\mathbf{Q}=k\left(\frac{T_2-T_1}{x_2-x_1}\right) \qquad (۱ـ۳ـ۳)$$

ضریب رسانندگی گرمـایی نسبت به‌دمـا نیز حساس است. اما برخلاف ضریب انبساط گرمایی، با رسیدن دما به‌بالاتر ازدمای اتاق، کاهش می‌یابد (دلایل این‌رفتار بعداً بررسی خواهدشد). تغییرات فشردگی اتمی، که باذوب وسایر نوآراییهای اتمی ناشی از تغییرات دما همراه‌اند، در مقادیر رسانندگی گرمایی تغییراتی ایجاد می‌کنند. (شکل ۱ـ۳ـ۱).

رابطهٔ ۱ـ۳ـ۳ چنین بیان می‌شود

$$\frac{\text{انرژی}}{\text{مساحت}\times\text{زمان}}=k\left[\frac{\text{تغییر دما}}{\text{ضخامت}}\right]$$

بنابرایـن، رسانـنـدگـی $k$ را اغلب تنهـا بـه‌صورت $\mathrm{J/(mm^2{\cdot}s)/(^\circ C/mm)}$، یا $\mathrm{(W/mm^2)/(^\circ C/mm)}$ می‌نویسند.**

---

* موادی مـانند گرافیت و میکا از نوع مواد چند سویند؛ یعنی خواص این مواد در جهتهـای مختلف بلوری متفاوت است. بنابراین عبارت کلیتر آن به‌صورت زیر است

$$\alpha_v=\alpha_x+\alpha_y+\alpha_z \qquad (\text{۱ـ۳ـ۲، الف})$$

در اینجا زیرنویسهای $x$، $y$، و $z$ مشخص‌کنندهٔ ضریب انبساط درامتداد سه‌محور مختصات است. دربسیاری ازمواد مهندسی این سه‌ضریب انبساط باهم برابرند، دراین‌صورت

$$\alpha_v=3\alpha_L \qquad (\text{۱ـ۳ـ۲، ب})$$

** هنگامی که واحدهای داده‌های مربوط به رسانندگی در جدولها ارائه می‌شوند متأسفانه همیشه‌سازگاری وجود ندارد. واحدهای ذکرشده دریانوشتهای پیوست (ج) برای‌تبدیل‌واحدهای مختلف انگلیسی و متریك با واحدهای فوق سازگارند.

**مثال ۱-۳-۱** سیمی آلومینیمی با تنش MPa ۳۴٫۵ کشیده می‌شود. چه‌مقدار ازدیاد دما لازم است تا طول به‌همان‌اندازه تغییر کند.

حل: داده‌های مربوط به‌مدولهای کشسانی و انبساط گرمایی را می‌توان از پیوست (ج) پیدا کرد.

$$\Delta L/L = s/E = (۳۴٫۵ \times ۱۰^{۶}\,\text{Pa})/(۷۰۰۰۰ \times ۱۰^{۶}\,\text{Pa})$$

$$= \alpha\Delta T = (۲۲٫۵ \times ۱۰^{-۶}/^\circ\text{C})(\Delta T)$$

$$\Delta T = ۲۲^\circ\text{C}(= ۴۰^\circ\text{F})$$

**توضیح.** تفاضل دما، $\Delta T$، را می‌توان به‌صورت ۲۲ K نیز ذکر کرد. زیرا هردو مقیاس، فواصل یکسانی دارند. ▲

**مثال ۱-۳-۲** سیمی فولادی به‌قطر ۲٫۸ mm وطول ۷٫۲m، پس‌ازآنکه بـا ۳۱MPa فشرده شود، دما ۱۰°C افزایش می‌یابد. نیرویی‌که (الف) قبل‌از افزایش دما و (ب) پس از افزایش دمـا به‌سیم وارد می‌شود چقدر است؟ (هیچ تغییری درکل طول مجاز نیست. $\alpha_{st} = ۱۱٫۷ \times ۱۰^{-۶}/^\circ\text{C}$)

حل:

(الف) $$F_۱ = (۳۱ \times ۱۰^{۶}\text{N/m}^۲)(\pi/۴)(۰٫۰۰۲۸\,\text{m})^۲ = ۱۹۰\text{N}$$

ب)معادلهٔ مربوط را می‌نویسیم

$$\alpha\Delta T + (e_۲ - e_۱) = ۰ = \alpha\Delta T + \Delta F/AE - (F_۲ - F_۱) = \alpha\Delta T AE.$$

داده‌ها را می‌توان از پیوست (ج) پیدا کرد

$$F_۱ - F_۲ = (۱۱٫۷ \times ۱۰^{-۶}/^\circ\text{C})(+۱۰^\circ\text{C})(\pi/۴)(۰٫۰۰۲۸\text{m})^۲$$

$$\times (۲۰۵ \times ۱۰^{۹}\,\text{N/m}^۲)$$

$$= ۱۴۸\,\text{N}$$

$$F_۲ = ۴۲\text{N}$$ ▲

**مثال ۱-۳-۳** دریك طرف صفحه‌ای از فولاد زنگ نزن به‌ضخامت ۰٫۴cm جریانی از آب داغ ودرطرف دیگرجریان‌سریعی‌ازهوا برقرار‌است،آنچنان‌که‌دمای دوطرف‌این‌صفحه به‌ترتیب ۹۰°C و ۲۰°C است. چند ژول گرما در دقیقه‌ازمیان‌این‌صفحه‌هدایت‌می‌شود؟

حل: با استفاده از داده‌های پیوست (ج)، داریم:

$$\mathbf{Q}=[0.0015(\mathrm{J/mm^2\cdot s})/(^\circ\mathrm{C/mm})](70^\circ\mathrm{C}/4\mathrm{mm})(60\mathrm{s/min})$$
$$=15.75\mathrm{J/mm^2\cdot min}.$$

توضیح. بعداًخواهیم‌دیدکه‌فولاد زنگ‌نزن به‌علت‌داشتن مقدار زیاد عناصر آلیاژی، نسبت به‌سایر فلزات رسانندگی گرمایی (و الکتریکی) کمتری دارد (فصل ۵). ▲

## ۱ـ۴ پاسخ به میدانهای الکتریکی*

**رسانندگی (و مقاومت ویژه).** اگر فلزات و نیمرساناهـا در یك میدان الکتریکی قرار گیرند بار الکتریکی هدایت‌می‌کنند. رسانندگی‌ماده ($\sigma$) به‌تعداد حاملهای بار ($n$)، مقدار باری‌که هرحامل‌حمل می‌کند ($q$) وتحرك هرکدام از حاملها ($\mu$) بستگی دارد. رسانندگی عکس مقاومت ویژه $\rho$ است

$$\frac{1}{\rho}=\sigma=nq\mu \qquad \text{(۱ـ۴ـ۱، الف)}$$

واحدهای آن به‌صورت زیر است

$$\Omega^{-1}\cdot\mathrm{m}^{-1}=\left(\frac{\text{تعداد حاملها}}{\mathrm{m}^3}\right)\left(\frac{\mathrm{C}}{\text{تعدادحاملها}}\right)\left(\frac{\mathrm{m/s}}{\mathrm{V/m}}\right) \qquad \text{(۱ـ۴ـ۱، ب)}$$

درفلزات و نیمرساناهایی‌که درآنها الکترونهاحامل بارند، تعداد بار برای‌هرحامل برابر $0.16\times10^{-18}\mathrm{C}$ یا $0.16\times10^{-18}\mathrm{a\text{-}s}$ است. تحرك $\mu$ را می‌توان به‌صورت سرعت خالص یا سرعت رانش $\overline{v}$ حاملها درنظر گرفت‌که ازمیدان الکتریکی $\mathcal{E}$ ناشی مـی‌شود و به‌ترتیب واحدهای m/s یا V/m را دارد

$$\mu=\frac{\overline{v}}{\mathcal{E}} \qquad \text{(۱ـ۴ـ۲)}$$

تحرك معمولاً برحسب $\mathrm{m^2/V\cdot s}$ است. روابط (۱ـ۴ـ۱) و (۱ـ۴ـ۲) مخصوصاً درفصل ۵ که نیمرساناها مطالعه می‌شود به‌کار خواهند رفت.

ضریب مقاومت ویژه $\rho$ ازخواص ماده است، وبنابراین به‌شکل بستگی ندارد. اگر شکل‌هندسی یکنواخت باشد آن را می‌توان به‌مقاومت $R$ تبدیل کرد

---

* مدرس ممکن است ترجیح دهدکه مبحث رسانندگی تافصل ۵ ومبحث ثابت دی‌الکتریك تا بخش ۷ـ۶ یا بخش ۸ـ۶ بررسی نشود.

$$R=\rho L/A \qquad (۱-۴-۳)$$

که در آن $L$ طول و $A$ سطح مقطع است. بـا معلوم بودن $R$ می‌توان رابطهٔ اصلی فیزیک بـرای شدت جـریـان $I$ برحسب آمپر و تـوان $P$ بـرحسب وات، یعنی $I=E/R$ و $P=EI=I^2R=E^2/R=\mathrm{J/s}$، را به‌کار برد.

**رفتار دی‌الکتریکی.** البته روشن است کـه عـایقهای الکتریکی بار الکتریکی را منتقل نمی‌کنند. بـا این حال این مواد در میدانهای الکتریکی منفعل نمی‌مانند. ایـن مطلب را می‌توان با قراردادن دوصفحهٔ الکترود به فاصلهٔ $d$ از هم و اعمال ولتاژ $E$ بین دو صفحه نشان داد [شکل ۱-۴-۱ (الف)]. میدان الکتریکی $\mathcal{E}$ گرادیان ولتاژ است

$$\mathcal{E}=\frac{E}{d} \qquad (۱-۴-۴)$$

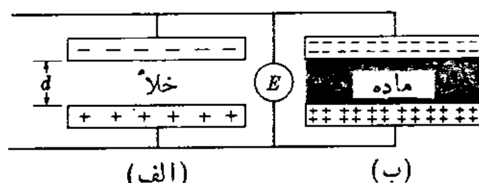
تحت این شرایط وقتی بین دوصفحه هیچ‌چیزی وجود ندارد، چگالی بار الکتریکی $\mathcal{D}_0$ روی‌هر کدام ازصفحات بامیدان الکتریکی $\mathcal{E}$ متناسب است. به‌ازای ۱V/m ازمیدان الکتریکی، باری معادل $۸٫۸۵\times ۱۰^{-۱۲}$ کولن درهر مترمربع الکترود وجود دارد

$$\mathcal{D}_0=(۸٫۸۵\times ۱۰^{-۱۲}\mathrm{C/V\cdot m})\mathcal{E} \qquad (۱-۴-۵)$$

این چگالـی بـار الکتریکی بـه‌ازای ۱V/m از میدان الکتریکـی بـه $۵۵\times ۱۰^{۶}$ الکترون/$\mathrm{m}^2$ احتیاج دارد، زیرا بار الکترون $۰٫۱۶\times ۱۰^{-۱۸}$ کولن است.

اگر مادهٔ $m$ بین الکترودهای شکل ۱-۴-۱ قرار گیرد در آن‌صورت چگالی بار الکتریکی می‌تواند از $\mathcal{D}_0$، که دربالا بیان شد، تا $\mathcal{D}_m$ افزایش یـابد. نسبت $\mathcal{D}_m/\mathcal{D}_0$ ثابت دی‌الکتریک نسبی $\kappa$ برای ماده‌ای است کـه به‌عنوان مادهٔ پرکنندهٔ فضای بین الکترودهـا مصرف می‌شود

$$\kappa=\frac{\mathcal{D}_m}{\mathcal{D}_0} \qquad (۱-۴-۶)$$




**شکل ۱-۴-۱** چگالی بارالکتریکی $\mathcal{D}$ برحسب‌ثابت دی‌الکتریک‌نسبی $\kappa$. وجودماده، چگالی بارالکتریکی $\mathcal{D}_m$ را افزایش می‌دهد؛ صفحات خازن نیز $\mathcal{D}_m$ را متناسب با ثابت دی‌الکتریک نسبی $\kappa$ نگه می‌دارد. $\mathcal{D}_m=\kappa\mathcal{D}_0$.

ثابت دی‌الکتریك نسبی در فصلهای ۷ و ۸ همراه با مطالعهٔ خواص دی‌الکتریکی پلاستیکها و سرامیکهای به‌کار رفته درخازنها بررسی خواهد شد.* ثابت دی‌الکتریك نسبی همیشه بزرگتراز ۱٫۰ است زیرا هم الکترونها وهم یونهای مثبت ومنفی اگر درمیدان الکتریکی قرارگیرند، درون ماده جابه‌جا می‌شوند.

**مثال ۱-۴-۱** قطر یك‌سیم‌مسی ۰٫۹mm است. الف) مقاومت‌هرفوت آن (۰٫۳۰۵ m) چقدر است؟ ب) اگر به‌m ۳۰ از این‌سیم ولتاژ ۱٫۵ ولت اعمال شود، چند ولت انرژی مصرف می‌شود؟

حل: ازپیوست (ج)، $\rho = ۱۷\Omega\cdot nm$

(الف) $R=(۱۷\times۱۰^{-۹}\Omega\cdot m)(۰٫۳۰۵m)/(\pi/۴)(۹\times۱۰^{-۴}m)^۲$

$=۰٫۰۰۸\,\Omega$

(ب) $P=\frac{E_۲}{R}$

$$=\frac{E^۲A}{\rho L}=\frac{(۱٫۵V)^۲(\pi/۴)(۹\times۱۰^{-۴}\,m)^۲}{(۱۷\times۱۰^{-۹}\Omega\cdot m)(۳۰\,m)}=۲٫۸ \text{ وات}$$

▲

**مثال ۱-۴-۲** سیلیسیم ناخالصی دارای مقاومتی برابر $\Omega\cdot m$ ۰٫۰۳ و تحرك باری برابر $m^۲/V.s$ ۰٫۱۹ است. الف) در هرمترمکعب ازآن چه تعداد حامل بار وجود دارد؟ ب) اگر به‌یك تراشهٔ ۰٫۴ میلی‌متری سیلیسیم ولتاژ ۵ mV اعمال شود سرعت رانش حاملهای بار چقدر است؟ اگر ولتاژ صفر باشد چطور؟

حل: از روابط (۱-۴-۱) و (۱-۴-۲) داریم

(الف) $q=۱/(۰٫۱۶\times۱۰^{-۱۸}\,A\cdot s)(۰٫۱۹\,m^۲/V\cdot s)(۰٫۰۳\,\Omega\cdot m)$

$=۱٫۱\times۱۰^{۲۱}/m^۳$

(ب) وقتی ۵ mV = ولتاژ

---

* ظرفیت خازن مسطح از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید

(۱-۴-۷) $C=\kappa(۸٫۸۵\times۱۰^{-۱۲}C/V\cdot m)(A/d)$

که درآن $A$ سطح صفحه و $d$ فاصلهٔ بین صفحات خازن است.

$$\bar{v} = (0{,}19\ m^2/V\cdot s)(0{,}005\ V/4 \times 10^{-4} m)$$
$$= 2{,}4\ m/s$$

وقتی ۰ = ولتاژ، $\bar{v} = 0\ m/s$.

توضیح. حرکت واقعی الکترون درهر دوحالت اساساً یکسان است. در ولتاژ صفر حرکت تصادفی است و حرکت انتقالی‌منتجه‌ای وجود ندارد. با افزایش میدانها سرعت خالص یا سرعت رانش افزایش می‌یابد. ▲

**مثال ۱-۴-۳** چراغی ۶ ولتی جریان مستقیمی با توان ۱۶ وات به‌مصرف می‌رساند. در هر دقیقه چند الکترون از رشتهٔ (فیلامان) آن عبور می‌کند؟

حل: از آنجا که $P = EI$

$$\text{شدت جریان} = 16\ \text{وات}/6V = 2{,}7\,A;$$
$$(2{,}7\,A)(60\,s) = 160\ A\cdot s.$$
$$\text{تعداد الکترونها} = 160\ A\cdot s/(0{,}16 \times 10^{-18}\ A\cdot s/el)$$
$$= 10^{21}\ \text{الکترون}$$

▲

**مثال ۱-۴-۴** دوصفحهٔ خازن (هر کدام به‌ابعاد $20mm \times 30mm$) موازی هم و به‌فاصلهٔ $2{,}2mm$ از یکدیگر قرار دارند. بین آنها چیزی وجود ندارد. برای ایجاد بار $0{,}24 \times 10^{-10}$ کولن در الکترودها، چه ولتاژی لازم است.

حل: با تغییر در روابط (۱-۴-۲) و (۱-۴-۵) و با استفاده از واحدهای متریک داریم

$$\text{ولتاژ} = \frac{(0{,}24 \times 10^{-10} C)/(0{,}03\ m)(0{,}02)m}{(8{,}85 \times 10^{-12} C/V\cdot m)/(0{,}0022m)} = 10\ \text{ولت}$$ ▲

## ۱-۵ ارائهٔ خواص

**اطلاعات کیفی.** نمودارهای طرحوار که اثر هرمتغیر را برخاصیت مربوط به‌آن نشان می‌دهند، برای تبدیل روابط پیچیدهٔ تجربی به‌عبارات کیفی، کمك بسیار ارزنده‌ای می‌کنند. مثلا شکل ۱-۵-۱ تغییراستحکام بتن را برحسب مقدارآب اضافه شده نشان می‌دهد. البته اگرمقدار آب به‌کاررفته کمینه باشد، بتن بیشینهٔ استحکام خود را خواهد داشت، اگر چه



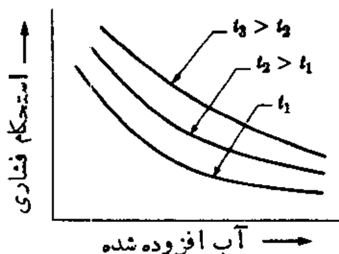

**شکل ۱-۵-۱** نمایش طرحوار دومتغیر. استحکام بتن برحسب مقدار آب اضافه شده. مقدار آب اضافه شده متغیری مستقل محسوب می‌شود.

برای تولید بتن قابل مصرف، آب باید به‌اندازهٔ کافی وجود داشته باشد.

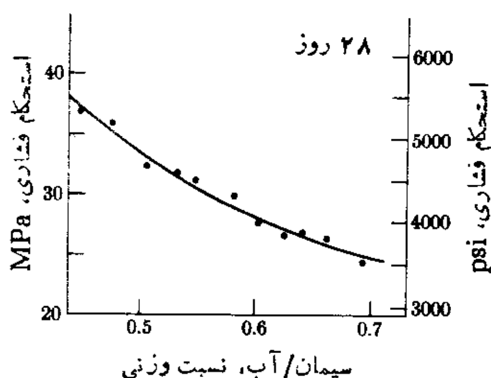
به‌کمك عوامل دیگر، طرحوارهٔ سایرمتغیرها را نیز می‌توان نشان داد. شکل ۱-۵-۲ عامل زمان، $t$، را به‌رابطهٔ نشان داده شده در شکل ۱-۵-۱ افزوده است. شکل ۱-۵-۲ نشان می‌دهدکه ۱) اگر مقدار معینی آب به‌سیمان بیفزاییم، استحکام آن با گذشت زمان افزایش‌می‌یابد؛ ۲) در مدت زمان معین درصورت به‌کار بردن آب اضافی استحکام‌کمتری به‌دست می‌آید؛ ۳) اگر مقدار آب مصرفی‌کمتر شود استحکام معینی را می‌توان در مدت زمان‌کمتری به‌دست آورد.

نمودارهای طرحوار در تعیین اینکه چه متغیرهایی را می‌توان برای‌کسب نتیجهٔ مطلوب کنترل کرد، به‌مهندسان کمك می‌کنند. به‌کمك چنین اطلاعاتی آنها می‌توانند اصلاحات لازم را در تولید یا مصرف مواد به‌وجود آورند.

**داده‌های کمی.** معمولا کسب داده‌های‌کمی در مورد خواص مواد مهم است. مثلا مهندس طراح به‌کمك شکل ۱-۵-۳ مشاهده می‌کندکه اگر نسبت مقدارآب به‌سیمان پرتلند ۵ر۰ باشد، استحکام فشاری بتن‌حاصل ۳۳ MPa خواهد بود. درهرحال برای‌تکمیل اطلاعات، عامل زمان نیز مانند داده‌های دیگر، از جمله اندازهٔ ذرات و دما باید در نظر گرفته شود زیرا هرکدام ازاین عوامل بر رابطه‌های‌کمی حاصل اثر می‌گذارد.



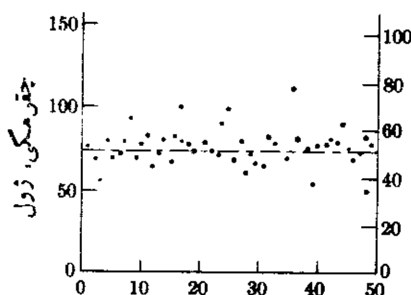

**شکل ۱-۵-۲** نمایش طرحوار سه متغیر. رابطهٔ استحکام بتن با زمان $t$ و مقدار آب.




**شکل ۱-۵-۳** مقادیر کمی. استحکام بتن برحسب مقدار آب اضافه شده (از استانداردهای آزمایش ASTM شمارهٔ ۳۹ C پیروی شده است).

**اختلاف داده‌ها.** کلیهٔ داده‌های آزمایشگاهی وصنعتی نوعی پراکندگی درمقدار دارند.* شکل ۱-۵-۴ پراکندگی نتایج به‌دست‌آمده ازآزمایش چقرمگی پنجاه نمونهٔ فولادی را در ۲۱°C (۷۰°F) نشان می‌دهد. حتی اگر نمونه‌ها و روشهای آزمایش حتی‌الامکان یکسان باشند، باز این مسئله وجود دارد. تغییر مقدار چقرمگی می‌تواند از چند منبع سرچشمه بگیرد: (۱) تفاوتهای غیرقابل رؤیت در داخل نمونه‌های فولادی؛ (۲) تفاوتهای ظریف درتهیهٔ نمونه‌ها؛ و (۳) تفاوتهای جزئی درطریقهٔ انجام آزمایش.

به‌علت وجود این گسترهٔ داده‌ها، معمولاً نتایج آزمایش را به‌صورت مقدار میانگین (متوسط) یا مقدار میانه(وسط) نشان می‌دهند. درمثال ۱-۵-۱ که در آن ۲۱ مقدار مختلف




**شکل ۱-۵-۴** اختلاف داده‌ها. تغییرات حاصل ازآزمایش ضربهٔ شارپی فولاد SAE ۱۰۴۰ (در ۲۱°C). تمام آزمایشات به‌طور مشابه انجام شده‌اند.

* یعنی نتایج چندین آزمایش در شرایط مختلف آزمایشگاهی یا صنعتی معین کاملاً یکی نیست. ـ م.

بـرای استحکام یك پلاستیك آورده شده است، مقادیـر میانگین و میانهٔ حاصل به‌ترتیب برابر ۲۰٫۷ MPa و ۲۰٫۹ MPa است. میانگین، $\bar{X}$، و میانهٔ $M$ با آنکه اعدادی نزدیك به‌هم اندکاملا یکسان نیستند. این اختلاف ناشی ازاین است که دراستحکامهای پایین نتایج پراکنده‌ترند.

دانستن یکی از مقادیر میانگین یا میانه مهندس طراح یا دانشورز کاربردی را کاملا راضی نمی‌کند. زیـرا بدین وسیله گسترهٔ استحکامها برایش مشخص نمی‌شود. ازاین‌رو او در پـی دانستن انحراف استاندارد (S.D) است. انحـراف استاندارد مقیاس آمـاری پراکندگی است و از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود

$$SD=\sqrt{\Sigma(X_i-\bar{X})^2/(n-1)} \qquad (1-5-1)\square$$

کـه درآن $\bar{X}$ میانگین و $X_i$ هرکدام از $n$ مقدار مجزاست. درعمل انحراف استاندارد ازاین نظر اهمیت داردکه چنانچه داده‌ها برای پیروی ازقوانین توزیع کافی باشند، تقریباً دو سوم نتایج بین ۱ SD $\pm$، و ۵٪ داده‌هـای آماری در خارج از ۲ SD $\pm$ قـرار می گیرند.

**دقت محاسبات.** معمولا سعی می‌شود که خواص ماده تا حدی که داده‌های موجود اجازه می‌دهند، دقیق محاسبه شوند. دراین‌کتاب، داده‌های موجود دو یا سه و به‌ندرت چهار رقم بامعنی دارند. این داده‌ها ازنوعی‌اندکه اغلب برای مواد تجارتی داده می‌شود. جوابهای حاصل از ماشین حساب معمولا شامل ارقام بی‌معنی است. لذا از به‌حساب آوردن ارقـام بی‌معنی بایـد خودداری کـرد. توصیه می‌شود جـواب نهایی (نه جوابهای ضمن کار) را به‌تعداد یکی* بیشتر از ارقام با معنی موجود در دادهٔ غیرصحیحی که‌کمترین دقت را دارد، گرد کنید.

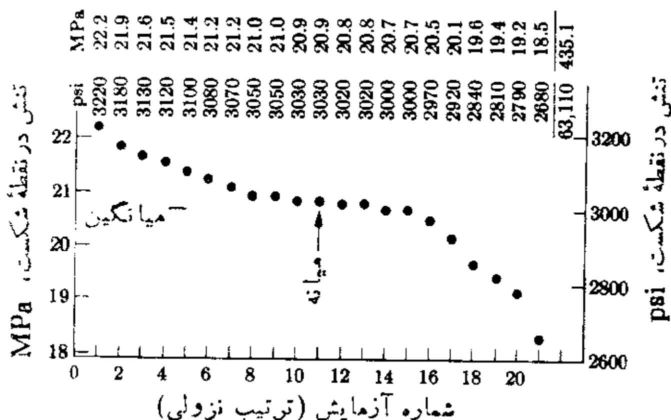
**مثال ۱-۵-۱** داده‌های آزمایش برای تعیین تنشهای شکست ۲۱ نمونهٔ پلاستیکی به‌ترتیب نزولی درشکل ۱-۵-۵ منظم شده است.

الف) دومقدار میانهٔ ($M$) و میانگین $\bar{X}$ را تعیین کنید.

ب) پراکندگی یا مقدار انحراف استاندارد، SD، را محاسبه کنید. □

---

* رقم افزوده شده گاه باعث می‌شود تقریب بهتری از عدد (قبل از گرد شدن) به‌دست آیـد. استثنا کردن اعداد صحیح با این مثال واضح می‌شود، بـرای تعیین میانگین وزن خانواده‌ای سه نفری با ترازویی به‌دقت یك صدم، انتظار نداریم که چون سه عدد صحیح است بـرای وزن متوسط فقط یك رقم اعشار درنظر گرفته شود.




**شکل ۱ـ۵ـ۵** واریانس در داده‌های آزمایش (مثال ۱ـ۵ـ۱ را ببینید). میانگین عبارت است از مقدار متوسط کلیهٔ مقادیر داده شده. مقدار میانه عبارت است از عدد وسط این اعداد.

حل:

(الف) یازدهمین مقدار (میانه) برابر MPa ۲۰ر۹ است. مقدار میانگین برابر است با

$$\bar{X} = \frac{\Sigma X}{۲۱} = \frac{۴۳۵ر۱ \text{ MPa}}{۲۱} = ۲۰ر۷ \text{ MPa}$$

(ب)

$$\text{SD} = \sqrt{\frac{\Sigma (X - \bar{X})^۲}{۲۰}} = \sqrt{\frac{۱۶ر۷۹}{۲۰}} = ۰ر۹ \text{ MPa} \qquad \square$$

توضیح: داده‌های شکل ۱ـ۵ـ۵ نوعی تغییر آماری دارند، زیرا از ۲۱ مقدار داده شده ۱۴ مقدار در فاصلهٔ MPa ۰ر۹ ± ۲۰ر۷ قرار دارد. میانه بیشتر از میانگین است زیرا پراکندگی درمیان داده‌های کمتر ازمقدار میانه بیشتر است. ▲

## مرور و بررسی مطالب

### خلاصه

اگر قرار باشد کـه صنعت و تکنولوژی احتیاجات جامعه را برآورده کند درآن صورت باید کاربرد درست و به جای مواد ممکن باشد. این امر مستلزم انتخاب مواد با مشخصات بهینه از نظر قیمت و در دسترس بودن و شرکت دادن آنها در طرحی است که بی‌خطر و اطمینان‌پذیر و با رفاه افراد سازگار باشد. برای دسترسی به‌چنین صنعتی باید موادی را کـه خصوصیات ویـژه‌ای مثل استحکام، رسانندگی گرمایی و الکتریکی و شکل‌پـذیری

دارند انتخاب کرد؛ بنابراین خواص مختلفی که مبنای طرحها و تولیدات‌اند مورد توجه ما هستند.

خواص و رفتار مواد ناشی ازساختار داخلی آنهاست. اگرمجموعهٔ خواص‌ویژه‌ای مورد نظر باشد، مواد باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که ساختارهای اتمی، بلوری و سایر آرایشهای داخلی‌مناسب را داشته باشند. اگرساختار داخلی‌مواد درخلال تولید یا مصرف تغییر کند، تغییرات متناظری نیز در خواص حاصل می‌شود.

دراین فصل تعدادی از (و البته نه‌کلیهٔ) خواصی‌که باید مورد توجه قرارگیرند ذکر شده است. با وجود این به‌کمك خواصی‌که در اینجا ذکر شده‌اند، در فصلهای بعد می‌توان صور ساختارهای داخلی مواد را شرح داد، که این ساختارها الف) در مقابل تغییرات حاصل از تنشهای‌مکانیکی اعمال‌شده مقاومت می‌کنند؛ ب) مشخصات معمولی‌مواد را وقتی‌که در دماهای بالا تحت ارتعاشات گرمایی قرار می‌گیرند توجیه می‌کنند؛ و ج) به چگونگی رفتار و پاسخ مواد در میدان الکتریکی مربوط می‌شوند. این صور مهم‌اند زیرا آگاهی از آنها به‌طراح در تعیین، و به‌صنعتگر در تولید موادی با ساختار داخلی و مشخصات بهینه برای محصولات حال و آینده کمك می‌کند.

درمواد جامدکرنش کشسان به‌وجود می‌آیدکه با تنش، به‌هرمیزانی‌که اعمال شود متناسب است. پس‌از حذف تنش اعمال‌شده این‌کرنش ازبین می‌رود. اگر تنش اعمال‌شده به‌مادهٔ انعطاف‌پذیر به‌حد کافی بالا باشد، کرنش پلاستیکی دائمی درآن به‌وجود می‌آید. مواد پراستحکامی که کرنش پلاستیکی زیادی درآنها به‌وجود می‌آید چقرمه‌اند، یعنی قبل از شکستن به‌انرژی قابل‌ملاحظه‌ای نیاز دارند.

انرژی‌گرمایی‌که برای افزایش دما به‌جسم داده شده، ارتعاش گرمایی درون ماده را بالا می‌برد. این انرژی اضافی، ساختار را منبسط می‌کند. انرژی گرمایی از طریق ارتعاشات اتمی و (درفلزات) ازطریق رسانش‌الکترونی به‌مناطق سردتر ماده منتقل‌می‌شود.

رسانندگی الکتریکی اغلب مواد رسانا به‌علت نفوذ الکترونها انجام می‌شود. در جسم عایق تحت میدانهای الکتریکی، بارهای الکتریکی حرکت نمی‌کنند، اما جا به‌جا می‌شوند، درنتیجه دی‌الکتریکها گرچه «عایق» محسوب می‌شوند خواص الکتریکی مفیدی دارند.

درانتهای‌فصل به‌اهمیت و دقت داده‌های مربوط به‌خواص توجه شده‌است. خواننده باید با اندازه‌گیریهای اصلی (میانگین و میانه) و مقیاس پراکندگی (انحراف استاندارد) نیز آشنا شود. علاوه براین به‌خواننده توصیه شده‌است‌که در ارائهٔ جوابهای به‌دست‌آمده ازماشین حساب، از به‌کاربردن ارقام بی‌معنی خودداری‌کند.

## سؤالات تشریحی

۱. سه نوع فولاد را نام ببرید و مشخصات هرکدام را ذکر کنید.

۲. سپر ماشین را می‌توان از ورق زره ساخت به‌طوری‌که در هنگام تصادف مچاله نشود. با بیان حداقل سه دلیل شرح دهیدکه چرا ازاین ماده استفاده نمی‌شود.
۳. با بررسی یك قطعه چوب بعضی ازمشخصات ساختاری آن را شرح دهید و بگوییدکه آنها چگونه خواص چوب را تحت‌تأثیر قرار می‌دهند.
۴. قبل از جنگ جهانی دوم، شرکتی بدنهٔ یك اتومبیل را از فولاد زنگ‌نزن ساخت. تا به‌حال اثر زنگ‌زدگی قابل اغماضی درآن دیده شده است. اگر این طرح برای تمام خودروها به‌کار می‌رفت چه اشکالاتی ممکن بود به‌وجود آید.
۵. سه خاصیت لازم و مهم مواد را که دررشتهٔ مهندسی خود (یعنی مهندسی‌مکانیك، عمران، برق و . . .) با آن برخورد می‌کنید، ذکر کنید.
۶. استحکام، انعطاف‌پذیری و چقرمگی را باهم مقایسه کنید.
۷. چرا تنش حقیقی همیشه بیشتر از تنش اسمی است؟ چــرا مهندس هنگام طراحی پل از تنش اسمی استفاده می‌کند؟
۸. درشکل ۱ـ۲ـ۱ (ج) چرا معمولاً استحکام تسلیم براساس ۲ر۰٪ کرنش دائمی‌تعریف می‌شود.
۹. وقتی به نقطهٔ بالایی منحنی شکل ۱ـ۲ـ۱ (ب) برسیم، بــار برداشته می‌شود. منحنی باربرداری عمودی خواهد بود یا شیبدار؟ چرا؟
۱۰. در سؤال ۹، پس از بــاربرداری، علائم سنجه روی قطعــهٔ مــورد آزمایش گذاشته می‌شود. دوباره به‌آن بار اعمال می‌شود تا بشکند. ازدیاد طول‌محاسبه‌شده به‌چه‌طریق تحت‌تأثیر قرار می‌گیرد؟
۱۱. درصدکاهش‌سطح مقطع را نمی‌توان از درصد ازدیاد طول محاسبه‌کرد (یا برعکس). با وجود آنکه هردو مقیاس انعطاف‌پذیری‌اند، چرا چنین است؟
۱۲. استحکام اسمی شکست (مبتنی برسطح اولیه) معمولاً کمتر از استحکام کششی است، ولی تنش واقعی شکست بیشتر از استحکام‌کششی است. دلیل آن را شرح دهید.
۱۳. چقرمگی را می‌توان به‌صورت سطح زیرمنحنی تنش-کرنش تعریف‌کرد. آیا این امر با این مفهوم‌که چقرمگی انرژی لازم برای شکستن است سازگار است؟
۱۴. واژه‌های حد کشسان و استحکام تسلیم گاهی به صورت مترادف به‌کار می‌روند. چرا این امر همیشه صحت ندارد؟
۱۵. «استحکام کششی، تنشی است کــه درآن، کرنش از حالت کشسان به‌پلاستیکی تبدیل می‌شود.» در بارهٔ اعتبار این عبارت نظر دهید.
۱۶. وضعیتی را بیان‌کنید کــه درآن‌کیلوگرم درعددی غیر از ۸ر۹ ضرب شود و نیوتن به‌دست آید.
۱۷. درکتابهای اروپایی‌که درممالك انگلیسی زبان نیز کاربرد بسیار دارند، مقدارسختی برحسب $kg/mm^2$ (یعنی kg بار برسطح فرورفتگی) مشخص می‌شود. این امــر درمحاسبات مهندسی چه مشکلاتی می‌توانند ایجادکنند؟

۱۸. تیزی لبهٔ یك ارهٔ برقی را آزمایش کنید. چرا ویژگیهایی مثل (الف) استحکام تسلیم، (ب) مدول کشسانی، (ج) مقاومت ویــژه و (د) مقاومت در برابر خوردگــی درآن اهمیت دارند؟

۱۹. ضریبهای انبساط گرمایی و رسانندگی گرمایی در صورت استفاده از °C یــا دمای مطلق K یکسان خواهند بود. درفصلهای بعد درجاهایی‌که انتخاب °C یا K تفاوت دارد دچار اشکال خواهیم شد. چرا دراینجا اهمیتی ندارد؟

۲۰. داده‌های مربوط به‌آهن و مس موجود در پیوست (ج) را در نظر بگیرید. اگر قرار باشد از آنها در محاسبات مهندسی استفاده شود تحت چه شرایط کاری بایــد اصلاح شوند؟

۲۱. رابطهٔ ۱-۳-۲ (ب) را ثابت کنید.

۲۲. ضریب رسانندگی گرمایی آهن، انــدکی بالاتــر از °C ۹۰۰، دارای ناپیوستگی است (شکل ۱-۳-۱). در این دمــا حجم نیز تغییر می‌کند. این تغییر حجم، انبساط است یا انقباض؟ چرا؟

۲۳. انواع حاملهایی‌را که می‌توانند بارهای‌الکتریکی را درمایع انتقال‌دهند، ذکر کنید.

۲۴. ثابت دی‌الکتریك نسبی ممکن است کمتر از یك باشد. چرا؟

۲۵. چرا بهتر است ارقــام اضافی (بی‌معنی) را به‌جای مراحل میانی در جــواب نهایی حذف کرد؟

۲۶. بــا مراجعه به‌فلزات پیوست (ج)، دو مجموعه از داده‌ها را مشخص کنید کــه به‌هم مربــوط باشند. منحنی طرحوار ارتباط آنها را رسم کنید، و اصول ارتباط آنها را شرح دهید.

## مسائل*

**۱-۱-۱** سیم یك وسیلهٔ خانگی مانند نان برشته‌کن یا قهوه‌جوش برقی را درنظر بگیرید. مواد مصرفی و دلیل احتمالی انتخاب آنها را ذکر کنید.

**۱-۱-۲** لامپ چراغ بــرق را به‌دقت نگاه کنید. چند نوع مادهٔ مختلف درآن می‌بینید؟ مشخصات گرمایی و الکتریکی هریك ازاین مــواد کدام‌اند؟ هرکدام ازاین مواد چه نوع

---

* مسائلی‌که شبیه مثالهای متن‌اند یا ارتباط نزدیك با عناوین ذکرشده دارنــد توسط اعداد ایرانیك مشخص‌شده‌اند؛ و ازآنها می‌توان برای شروع استفاده کرد. بقیهٔ مسائل، مانند مسائلی که درعمل با آنها مواجه می‌شویم، تنها شکل تغییریافتهٔ مسائل قبلی نیستند بلکه باید روابط لازم به‌دست آیند. این مسائل با حروف سیاه مشخص شده‌اند. دانشجو باید بتواند تعداد زیادی ازاین‌نوع مسائل را که مبتنی بردرك مفهوم‌اند حل کند.

مسائل مربوط به‌مبحثهایی‌که دراختیار مدرس‌اند با مربع توخالی مشخص شده‌اند.

مشخصات گرمایی و الکتریکی باید داشته باشند؟

۱ـ۲ـ۱ به‌سیم مسی نباید بیشتر از ۷۰ MPa تنش کششی اعمال کرد. اگـر لازم باشد که بار ۲۰۰۰ kg را تحمل کند چه قطری باید داشته باشد؟

جواب: ۱۹ mm

۱ـ۲ـ۲ کرنش کشسان در سیم مسی تحت تنش ۷۰ MPa چقدر است؟ (مدول کشسانی و سایر خواص فلزات مهم درپیوست (ج) داده شده است.)

۱ـ۲ـ۳ الف) میله‌ای فـولادی به‌قطر ۱۲٫۷ mm تحت بـاری بـرابـر ۷۰۰۰ kg (و بنابراین نیرویی معادل ۶۸۶۰۰ N) قـرار دارد. چه تنشی براین میله اعمال می‌شود؟ ب) اگر مدول کشسانی این میله ۲۰۵۰۰۰ MPa باشد، این بار چه‌کرنشی درآن ایجاد می‌کند؟

جواب: الف) ۵۴۰ MPa ب) ۰٫۰۰۲۶

۱ـ۲ـ۴ درمسئلهٔ ۱ـ۲ـ۳ میله بیشینهٔ بـار ۱۱۸۰۰ kg را بـدون تغییرشکل پلاستیکی تحمل می‌کند. استحکام آن چقدر است؟

۱ـ۲ـ۵ در مسئلهٔ ۱ـ۲ـ۳، میلهٔ تحت بـار ۱۱۴۰۰ kg (و بنابراین نیرویـی معـادل ۱۱۱۰۰۰ N) می‌شکند. قطر نهایی آن ۷٫۸۷ mm است. الف) استحکام حقیقی شکست آن چقدر است؟ ب) استحکام اسمی شکست آن (براساس سطح اولیه) چقدر است؟

جواب: الف) ۲۲۸۰ MPa ب) ۸۷۵ MPa

□ ۱ـ۲ـ۶ مفرغ دارای مدول کشسانی ۱۱۰۰۰۰ MPa، استحکام تسلیم ۱۵۸MPa، استحکام اسمی‌شکست ۲۳۸ MPa، وکاهش سطح مقطع ۳۴٪ است. الف) کرنش‌حقیقی درست قبل از آنکه تسلیم آغاز شود چقدر است؟ ب) تنش حقیقی در نقطهٔ شکست چقدر است؟ (به‌مثال ۱ـ۲ـ۴ رجوع کنید.)

۱ـ۲ـ۷ آلیاژمسی دارای مدول کشـانی ۱۱۰۰۰۰ MPa، استحکام تسلیم ۳۳۰MPa و استحکام کششی ۳۵۰ MPa است. الف) برای اینکه میله‌ای به‌طول ۳ متر ازاین‌آلیاژ، به‌مقدار ۱٫۵ mm کشیده شود تنش لازم چقدر است؟ ب) قطر میله چقدر باشد تا بتواند بدون تغییرشکل دائمی نیرویی معادل ۲۲۰۰۰ N را تحمل کند؟

جواب: الف) ۵۵ MPa ب) ۹٫۲ mm

۱ـ۲ـ۸ قطر سیمی از آلیاژ منیزیم ۱٫۰۵ mm است.طبق پیوست (ج)، مدول کشسانی آن ۴۵۰۰۰ MPa است. تغییرشکل پلاستیکی در بار ۱۰٫۵ kg (که — نیوتن است) آغاز می‌شود. کل کرنش پس از اعمال بار ۱۲٫۱ kg، ۰٫۰۰۸۱ است. کرنش دائمی

به‌وجود آمده در بار ۱۲٫۱ kg چقدر است؟

**۱-۲-۹** آلومینیم (آلیاژ ۶۱۵۱) دارای مدول کشسانی ۷۰۰۰۰ MPa و استحکام تسلیم ۲۷۵ MPa است. الف) سیمی به‌قطر ۲٫۷۵ mm ازاین آلیاژ چقدر بار را بدون رسیدن به‌نقطهٔ تسلیم می‌تواند تحمل کند؟ ب) اگر باری معادل ۴۴ kg به ۳۰٫۵ m از این سیم اعمال شود کل ازدیاد طول چقدر خواهد بود؟

جواب: الف) ۱۶۳۰ N یا ۱۶۷ kg ب) ۳۲ mm

**۱-۲-۱۰** فلز مونل (۷۰ Ni — ۳۰ Cu) دارای مدول کشسانی ۱۸۰۰۰۰ MPa و استحکام تسلیم ۴۵۰ MPa است. الف) میله‌ای به قطر ۱۸ میلی متر از این فلز چه مقدار بار را بدون رسیدن به‌نقطهٔ تسلیم می‌تواند تحمل کند؟ ب) اگر بیشینهٔ ازدیاد طول مجاز برای میله‌ای به طول ۲٫۱ متر برابر ۲٫۵ میلی‌متر باشد چه مقدار بار می‌تواند به‌این میله اعمال شود؟

☐ **۱-۲-۱۱** با مراجعه به مثال ۱-۲-۴ و توضیح آن، کرنش حقیقی در نقطهٔ شکست چقدر است؟

جواب: ۱٫۴۷ (یا ۱۴۷٪)

**۱-۲-۱۲** میله‌ای ازفولاد ۱۰۲۰ به‌قطر ۶٫۴ mm و طول ۱٫۸۳ m تحت باری معادل ۴۴۵۰N قرار دارد. اگر این بار به‌میله‌ای‌ازفلزمونل ۷۰-۳۰ وارد شود (مسئلهٔ ۱-۲-۱۰ را ببینید) تفاوت طول در دوحالت چقدر است؟

**۱-۲-۱۳** بنا بر یك اصل تجربی قدیمی استحکام کششی فولاد در واحد انگلیسی معادل تقریباً ۵۰۰ برابر عدد سختی برینل آن است؛ یعنی $(S_t)_{psi} \approx$ ۵۰۰ (BHN). الف) این موضوع را در مورد شکل ۱-۲-۳ (ب) بررسی کنید. ب) رابطهٔ ثابت مشابهی نیز بین $(S_t)_{MPa}$ و BHN پیدا کنید.

جواب: $(S_t)_{MPa} \approx$ ۳٫۵ (BHN)

☐ **۱-۲-۱۴** با مراجعه به‌مسئلهٔ ۱-۲-۶، کرنش‌حقیقی را درنقطهٔ شکست به‌دست آورید.

**۱-۲-۱۵** سیمی ازفولاد ۱۰۴۰، ۰٫۸۹ mm قطر دارد. استحکام تسلیم آن ۹۸۰ MPa و استحکام کششی آن ۱۱۳۰ MPa است. همچنین آلیاژ آلومینیمی موجود است که استحکام تسلیم آن ۲۵۵ MPa، و استحکام کششی آن ۴۰۰ MPa است. الف) سیم فولادی چقدر (چند درصد) ازسیم آلومینیمی سنگینتر یا سبکتر باشد تا بار ۴۰ kg را تحمل کند و همان تغییرشکل کشسان سیم آلومینیمی درآن ایجاد شود. ب) سیم فولادی چقدر (چند درصد) ازسیم آلومینیمی سبکتر یا سنگینتر باشد تا بتواند همان بار بیشینه را بدون تغییرشکل تحمل کند؟ ج) این تفاوت چقدر باید باشد تا سیم بتواند بار بیشینه را

بدون شکست تحمل کند. (راهنمایی: نسبت جرمها را بدون محاسبهٔ سطح مقطعهای واقعی معین کنید.)

جواب: الف) ۰٫۷٪+ ب) ۳۲٪+ ج) ۳٪−

۱–۳–۱ دمای میله‌ای برنجی به‌طول ۲ متر، ۸۰°C (۱۴۴°F) افزایش می‌یابد. براساس داده‌های پیوست (ج)، چه تنشی لازم است تا طول به‌همین مقدار تغییر کند؟

جواب: ۱۷۶ MPa

۱–۳–۲ سیمی آهنی بین دو ساختمان بسته شده و تحت تنش ۲۰ MPa قرار گرفته‌است. دمای هوا ناگهان از ۲۵ °C به ۱۹ °C کاهش می‌یابد. تنش جدید چقدر است؟

**۱–۳–۳** ضریب انبساط خطی گرمایی متوسط میله‌ای ازفولاد مخصوصی $۱۲ \times ۱۰^{-۶}\,°C^{-۱}$ است. الف) برای ایجاد تغییر طول برابر تغییر طول حاصل از تنش ۶۲۰ MPa، دما چه‌مقدار باید تغییر کند؟ ب) تغییرحجم حاصل ازاین دما چقدر است؟

جواب: الف) $\Delta T = ۲۵۰\,°C\,(۴۵۰\,°F)$ ب) ۰٫۹٪

**۱–۳–۴** ریل فولادی جوش داده شده‌ای کـه در محلی با دمای ۳۵ °C (۹۵ °F) قرار گرفته طوری خم شده است که نمی‌تواند منقبض شود. اگر دما به ۰ °C برسد چه‌مقدار تنش در آن ایجاد می‌شود؟

۱–۳–۵ الف) اگر به‌جای صفحهٔ فولادی زنگ‌نزن درمثال ۱–۳–۳ صفحه‌ای مسی قرار دهیم چقدر گرمـا منتقل می‌شود. ب) مقدار آن را برحسب وات برسانتی‌مترمربع محاسبه کنید (ثانیه × آمپر × ولت = ژول یا ثانیه × وات = ژول).

جواب: الف) ۴۲۰ J/mm² · min ب) ۷ w/mm²

**۱–۳–۶** مایع گرمی از طریق یك لولهٔ مسی به قطر ۵۰ mm بـا دیواره‌ای به‌ضخامت ۱٫۰ mm پمپ می‌شود. دمای فلز درداخل ۱۴۰ °C و درخارج ۲۵ °C است. گرمایی را که در هرساعت در هرمتر لوله منتقل می‌شود، تخمین بزنید.

**۱–۳–۷** مسئلهٔ ۱–۳–۶ را برای آهنی‌که دمای داخل و خارج آن به‌ترتیب ۸۲۰ °C و ۷۲۵ °C است تکرارکنید. (داده‌های پیوست (ج) ممکن است مناسب نباشند.)

جواب: ~ ۱۵۰۰ MJ/hr

**۱–۳–۸** الف) به‌کمك داده‌هـای پیوست (ج) نسبت رسانندگی گرمایی به رسانندگی الکتریکی، $k/\sigma$، برای هرفلز چقدر است؟ ب) براساس محاسبات خود درمورد ارتباط بین رسانندگیهای گرمایی و الکتریکی نتیجه‌ای کلی بگیرید.

۱–۴–۱ در هرمترمکعب از یك نیمرسانا $۱۰^{۲۰}$ الکترون وجود دارد و تحرك الکترونها

برابر $0.19\,m^2/V\cdot s$ است الف) مقاومت‌ویژهٔ این‌نیمرسانا چقدر است؟ ب) رسانندگی آن چقدر است؟

جواب: الف) $0.33\,\Omega\cdot m$ ب) $3\,\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$

۱-۴-۲ یك نیمرسانا در هرمترمکعب $10^{21}$ الکترون داردکه به‌عنوان حاملهای بار عمل می‌کنند. مقاومت ویژهٔ آن $0.1\,\Omega\cdot m$ است. الف) تحرك الکترونها ($\mu$) چقدر است؟ ب) اگرگرادیسان ولتاژ $0.16\,V/mm$ باشد، سرعت رانش $\bar{v}$ چقدر است؟

۱-۴-۳ الف) اگر سیمی ازمس خالص (با مقاومت ویژهٔ $17\,\Omega\cdot nm$) به‌قطر $1\,mm$ در یك مدار الکتریکی کـه جریان ۱۰ آمپر ازآن می‌گذرد، به‌کار رود، در $0.305\,m$ (یك فوت) چند وات گرما بـه‌هدر می‌رود؟ ب) اگر به‌جای سیم مسی ازسیمی برنجی با همان اندازه استفاده شود گرمای هدر رفته چند وات بیشتر است؟ (مقاومت ویژهٔ برنج = $0.32\,\Omega\cdot nm$)

جواب: الف) $0.66\,W$ ب) $\Delta = 0.6\,W$

۱-۴-۴ درمسئلهٔ ۱-۲-۸، طول سیم قبل‌از بارگذاری $3.07\,m$ است. الف) مقاومت آن برابر ــــــ است. ب) اگر ازاین سیم ۱٫۵ ولت برق عبورکند، ــــــ الکترون در هرمیلی ثانیه وارد سیم می‌شود.

۱-۴-۵ اندازه‌گیری نشان می‌دهـد کـه اگـر به دوسر $57\,mm$ از نیمرسانایی ولتاژ ۳۰ میلی‌ولت اعمال شده باشد سرعت رانش الکترونها دراین نیمرسانا که درهرمترمکعب $10^{20}$ حامل بار دارد، $200\,mm/s$ است. مقاومت ویژهٔ نیمرسانا چقدر است؟

جواب: $0.164\,\Omega\cdot m$

۱-۴-۶ چگالی الکترون در الکترودهای مثال ۱-۴-۴ چقدر است؟

۱-۴-۷ فضای بین صفحات مثال ۱-۴-۴ با ورقی از پلی‌استیرن به‌ضخامت $2.2\,mm$ پر شده‌است، و با اعمال‌ولتاژ ۱۰ ولت، بار از $0.24 \times 10^{-10}\,C$ به $0.6 \times 10^{-10}\,C$ افزایش می‌یابد. ثابت دی‌الکتریك نسبی پلی‌استیرن چقدر است؟

جواب: ۲٫۵

۱-۴-۸ ثابت دی‌الکتریك نوار شیشه‌ای برابر ۱٫۶ است. آیا خازنی‌که درآن ازاین نوع ماده بـا ضخامت $0.25\,mm$ به‌عنوان عایق استفاده شود ظرفیت بیشتری دارد یـا خازن دیگری با همان سطح‌که درآن ازعایق پلاستیکی به‌ضخامت $100\,\mu m$ و با ضریب دی‌الکتریکی برابر ۲٫۱ استفاده شده است؟

۱-۴-۹ اگر بدون تغییر ولتاژ اعمال شده فضای بین الکترودهای‌خازن از $0.10\,mm$

به ۰٫۰۶ mm کاهش یابد، ثابت دی‌الکتریك نسبی‌جدید خازن‌چقدر باید باشد تا چگالی بار یکسان باقی بماند؟ ثابت دی‌الکتریك نسبی عایق موجود ۳٫۳ است.

جواب: ۲٫۰

**۱-۴-۱۰** به‌جای سیم‌فولادی مسئلهٔ ۱-۲-۱۵ سیمی مسی به‌همان ابعاد قرار داده می‌شود. مقاومت سیم مسی چند درصد بیشتر (٪+)، یا کمتر (٪−) خواهد بود؟

**۱-۴-۱۱** سیمی مسی (به‌قطر ۱٫۱ mm) برای ساخت مقاومت خاصی درنظر گرفته شده است. اگر سیمی از آلومینیم خالص مقاومت یکسانی داشته باشد چقدر سنگینتر (٪+) یا سبکتر (٪−) است؟ (راهنمایی: بدون محاسبهٔ سطوح واقعی، نسبتی از جرمها بدست آورید.)

جواب: ٪۴۸−

۱-۵-۱ در نیمرسانایی $۱٫۶ \times ۱۰^{۲۱}$ حامل در هرمتر مکعب وجـود دارد. تحرك آنها ۰٫۲۱ $m^2/V \cdot s$ است. ماشین حساب مقاومت ویژه را ۰٫۰۰۰۴۸۷۹۰۰۷۸۱ $\Omega \cdot m$ نشان می‌دهد. این جواب را با ارقام با معنی مناسب بیان کنید.

جواب: ۰٫۰۰۰۴۸۸ (یا $۰٫۰۰۰۴۸_۸$)

۱-۵-۲ «چهار سوارکار» ۲۱۵، ۱۹۷، ۲۱۱ و ۱۸۱ پوند وزن دارنـد. میانگین وزن آنها را با تعداد مناسب ارقام بامعنی ذکر کنید.

۱-۵-۳ نمرات ۱۵ دانشجو درامتحان مواد (از ۱۴۵ نمره) ۸۹، ۱۳۷، ۹۵، ۹۸، ۵۷، ۷۷، ۱۲۱، ۶۹، ۱۰۱، ۱۰۸، ۵۱، ۸۸، ۱۱۷، ۸۰، ۱۰۹ بوده‌است. الف) میانهٔ نمرات چقدر است؟ ب) میانگین نمرات چقدر است؟ ج) نمراتی‌که در یك چهارم قرار می گیرند کدام‌اند؟

جواب: الف) ۹۵ ب) ۹۳٫۱ ج) ۷۷، ۱۰۹

☐ **۱-۵-۴** نتایج مسابقات بسکتبال سال گذشته را به‌دست آورید. مقدار میانگین-میانه و انحراف استاندارد تعداد گلها را الف) در زمین خود و ب) در زمین حریف حساب کنید.

**۱-۵-۵** مقدار الف) میانگین و ب) میانهٔ چگالی نوع بخصوصی ابرلاستیکی را براساس داده‌های تجربـی زیـر حساب کنید: ۲٫۶۰، ۳٫۰۰، ۲٫۳۰، ۲٫۴۰، ۲٫۱۰، ۲٫۶۰، ۲٫۷۰، ۲٫۹۰، ۲٫۸۰ گرم برسانتی‌مترمکعب(یا $Mg/m^3$). ☐ ج) انحراف‌استاندارد داده‌ها چقدر است؟

جواب: الف) ۲٫۵۶ $Mg/m^3$ ب) ۲٫۶ $Mg/m^3$
ج) ۰٫۳۰ $Mg/m^3$ $(= ۰٫۰۳۰ g/cm^3)$

# ۲

## آشنایی با مواد: مروری بر پیوندهای شیمیایی

### چشم‌انداز فصل

در تمام جامدات، اتمها را پیوندها به‌یکدیگر متصل می‌کنند. پیوندها درجامدات تأمین‌کنندهٔ استحکام و خواص الکتریکی و گرمایی مربوط به‌آنان‌اند. مثلا پیوندهای قوی سبب ایجاد نقطهٔ ذوب بالا، مدول کشسانی بالا، فاصلهٔ بین اتمی کوتاهتر، و ضریب انبساط گرمایی کمتر می‌شوند.

دراین‌فصل به‌مفاهیمی که درشیمی‌عمومی با آنها سروکار داریم می‌پردازیم. نخست‌لازم است نقش الکترونهای‌ظرفیتی‌را درپیوندهای‌اصلی ــ یونی، کووالانسی، و فلزی ــ با جزئیات‌کافی بررسی کنیم تا بتوانیم آثار آنها را برفاصلهٔ بین اتمی و کوئوردیناسیون اتمی پیش‌بینی کنیم. همچنین این‌پیوندها مبنای دسته‌بندی کردن مواد به‌فلزات، پلی‌مرها (پلاستیکها) و سرامیکهایند.

## هدف از مطالعه

۰۱ مرور آن قسمت از شیمی عمومی که به‌پیوندهای بین اتمها مربوط است.

۰۲ درك اصطلاحات و مفاهیم کلیدی، به‌طوری که بتوان مباحث بعدی را آسانتر دنبال کرد.

۰۳ دانستن ویژگیهای سه نوع پیوند اولیهٔ اصلی (البته می‌دانیم که پیوندهای واقعی معمولا ترکیب بیش از یك نوع ازاین پیوندهایند).

۰۴ ایجاد تصویری کیفی ازچگونگی تغییر نیروها و انرژیها با فواصل اتمی (مطابق شکل ۲ــ۵ــ۲) تا درفصلهای بعد پایه‌ای باشد برای درك فاصلهٔ بین اتمی، مدول کشسانی، انبساط گرمایی، و غیره.

۰۵ درك عوامل مختلفی که براندازهٔ اتم اثرمی گذارند. باید بتوان اختلافهای ابعاد اتم را درجدول ۲ــ۵ــ۱ تفسیر کرد.

۰۶ دانستن ویژگیهای سه نوع اصلی ماده (البته می‌دانیم که بسیاری از مواد ویژگیهای بینابین دارند).

۰۷ بسط بعضی ازکلیات مربوط به‌خواص که با نوع پیوند ارتباط دارند.

## ۲ــ۱ اتمها و یونهای تنها

اتم واحد اصلی‌ساختار داخلی مواد است. مفاهیم اولیهٔ مربوط به‌اتمهای تنها برای‌بسیاری از خوانندگان آشناست. این‌مفاهیم شامل عدداتمی، جرم اتمی و ارتباطهای جدول تناوبی‌اند. ترازهای انرژی حاصل از الکترونهای اتمها نیز مورد توجه قرار خواهندگرفت.

**واحد جرم اتمی.** ازآنجا که اتمها، درمقایسه با آنچه به‌طور روزمره سروکار داریم دارای جرم فوق‌العاده‌کوچکی‌اند، بهتر است از واحد جرم اتمی به‌عنوان پایه‌ای برای بسیاری‌ازمحاسبات استفاده شود. بنا به‌تعریف، یك دوازدهم جرم اتمی کربن۱۲، معمولیترین ایزوتوپ کربن، واحد جرم اتمی است. درهر گرم $۰٫۶۰۲۲ \times ۱۰^{۲۴}$ واحد جرم اتمی وجود دارد. ازاین ضریب تبدیل (به‌نام عدد آواگادرو، $N$) به روشهای مختلفی استفاده می‌شود. از آنجا که کربن طبیعی تقریباً یك درصد $C^{13}$ و ۹۸٫۹ درصد $C^{12}$ دارد، میانگین جرم اتمی کربن ۱۲٫۰۱۱۰۰۰ واحد جرم اتمی است، که همان مقداری است که در جدول تناوبی (شکل ۲ــ۱ــ۱) و در جدولهای عناصر برگزیده (پیوست (ب)) ذکر شده است. جرم اتمی عناصری که خواننده معمولا با آنها سروکار دارد عبارت‌اند از:

فلزات ——— غیرفلزات

| IA | IIA | IIIB | IVB | VB | VIB | VIIB | VIII | VIII | VIII | IB | IIB | IIIA | IVA | VA | VIA | VIIA | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| [illegible] | | | | | | | | | | | | | | | | 1 H 1.0079 | 2 He 4.0026 |
| 3 Li 6.939 | 4 Be [illegible] | | | | | | | | | | | 5 B 10.811 | 6 C [illegible] | 7 N 14.007 | 8 O 15.9994 | 9 F 18.998 | 10 Ne 20.183 |
| 11 Na [illegible] | 12 Mg [illegible] | | | | | | | | | | | 13 Al 26.98 | 14 Si [illegible] | 15 P [illegible] | 16 S 32.064 | 17 Cl 35.453 | 18 Ar 39.95 |
| 19 K 39.102 | 20 Ca [illegible] | 21 Sc 44.96 | 22 Ti 47.90 | 23 V 50.94 | 24 Cr 52.00 | 25 Mn 54.94 | 26 Fe [illegible] | 27 Co 58.93 | 28 Ni 58.71 | 29 Cu 63.54 | 30 Zn 65.37 | 31 Ga 69.72 | 32 Ge 72.59 | 33 As [illegible] | 34 Se 78.96 | 35 Br 79.91 | 36 Kr 83.80 |
| 37 Rb 85.47 | 38 Sr [illegible] | 39 Y 88.91 | 40 Zr 91.22 | 41 Nb [illegible] | 42 Mo 95.94 | 43 Tc [illegible] | 44 Ru [illegible] | 45 Rh 102.91 | 46 Pd 106.4 | 47 Ag 107.87 | 48 Cd 112.40 | 49 In 114.82 | 50 Sn 118.69 | 51 Sb [illegible] | 52 Te [illegible] | 53 I 126.90 | 54 Xe 131.30 |
| 55 Cs 132.91 | 56 Ba 137.34 | 57-71 La [illegible] | 72 Hf 178.49 | 73 Ta 180.95 | 74 W 183.85 | 75 Re 186.2 | 76 Os 190.2 | 77 Ir 192.2 | 78 Pt 195.1 | 79 Au 196.97 | 80 Hg 200.59 | 81 Tl 204.37 | 82 Pb 207.19 | 83 Bi 208.98 | 84 Po 210 | 85 At 210 | 86 Rn 222 |
| 87 Fr 223 | 88 Ra 226 | 89 Ac [illegible] | | | | | | | | | | | | | | | |

| 58 Ce 140.12 | 59 Pr 140.91 | 60 Nd 144.24 | 61 Pm 145 | 62 Sm 150.35 | 63 Eu 151.96 | 64 Gd 157.25 | 65 Tb 158.92 | 66 Dy 162.50 | 67 Ho 164.93 | 68 Er 167.26 | 69 Tm 168.93 | 70 Yb [illegible] | 71 Lu [illegible] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 90 Th 232.04 | 91 Pa 231 | 92 U 238.03 | 93 Np 237 | 94 Pu 242 | 95 Am 243 | 96 Cm 247 | 97 Bk 249 | 98 Cf 251 | 99 Es 254 | 100 Fm 253 | 101 Md 256 | [illegible] | [illegible] |

**شکل ۲-۱-۱** جدول تناوبی عناصر، که نشاندهندهٔ عدد اتمی و جرم اتمی (برحسب amu) است. چون هرگرم برابر $۶٫۰۲ \times ۱۰^{۲۴}$ amu است، جرم اتمی برابرگرم بر $۶٫۰۲ \times ۱۰^{۲۴}$ اتم خواهد بود. فلزات به‌آسانی الکترونهای آخرین مدار خود را از دست می‌دهند، ولی غیرفلزات به‌آسانی الکترون اضافی می‌پذیرند یا به‌اشتراک می‌گذارند.

H ۱٫۰۰۷۹ واحد جرم اتمی (یا ۱٫۰۰۷۹ گرم بر ($۰٫۶۰۲ \times ۱۰^{۲۴}$ اتم))

D ۱۲٫۰۱۱

O ۱۵٫۹۹۹۴

Cl ۳۵٫۴۵۳

Fe ۵۵٫۸۴۷

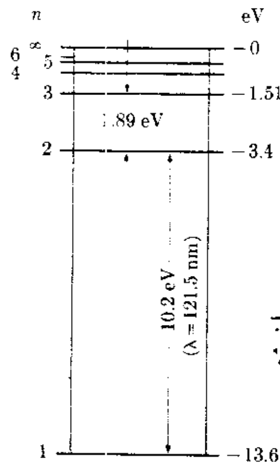
درتمام محاسبات بجز محاسبات بسیار دقیق، این مقادیر را می‌توان به‌صورت ۱، ۱۲، ۱۶، ۳۵٫۵، و ۵۵٫۸ واحد جرم اتمی (amu) گردکرد.

عدداتمی نشاندهندهٔ تعداد الکترونهای یك اتم خنثی (وتعداد پروتونهای هسته) است. هرعنصر عدد اتمی واحدی دارد. فهرست عناصر برگزیده، از هیدروژن با عدداتمی یك تا اورانیم (با عدد اتمی ۹۲) در پیوست (ب) آمده است. الکترون، به‌ویژه الکترونهای مدار آخر بر بیشتر خواص موردتوجه مهندسان اثرمی‌گذارد. مثلا ۱) خواص شیمیایی را تعیین می‌کند؛ ۲) پیوندهای بین اتمی و در نتیجه ویژگیهای مکانیکی و استحکام را سبب می‌شود؛ ۳) اندازهٔ اتم را تعیین مـی‌کند وبر رسانندگی الکتریکی مـواد اثر می‌گذارد؛ ۴) بر ویژگیهای نوری اثر می‌گذارد. در نتیجه به‌توزیع ترازهای انرژی الکترونهـا در اطراف هستهٔ اتم توجه‌خاصی مبذول خواهیم کرد.

**جدول تناوبی.** تناوب عناصر را در درس شیمی دیده‌ایم، لذا ویژگیهای آن را دراینجا تکرار نخواهیم کرد و فقط به‌این نکته توجه می‌کنیم کـه اتمها در جدول تناوبی (شکل ۲ــ۱ــ۱) برحسب زیادشدن عدداتمی مرتب شده‌اند، به‌نحوی‌که ستونهای‌عمودی که گروه نامیده‌می‌شوند به‌اتمهایی بامشخصات شیمیایی و الکترونی‌مشابه تعلق دارند. به‌طورخلاصه عناصری که درمنتهی‌الیه سمت‌چپ جدول تناوبی قرار دارند به‌آسانی به‌صورت یون در می‌آیند و یون‌مثبت یا کاتیون تشکیل می‌دهند و آنهایی کـه در قسمت بالا و سمت راست واقع‌اند به‌راحتی الکترون می‌پذیرند یا به‌اشتراك می‌گذارند، یعنی الکترونگاتیوند.

**الکترون.** از آنجا کـه الکترون جزئی از تمام اتمهاست، بار الکتریکی منفی آن معمولا به‌عنوان یکا به‌کار می‌رود. دریکاهای فیزیکی، این‌بار برابر $۰٫۱۶ \times ۱۰^{-۱۸}$ A·S برای هرالکترون (یا $۰٫۱۶ \times ۱۰^{۱۸}$ کولن برالکترون) است.

حرکت الکترونها در فاصلهٔ بین هسته‌هـای مجاور به‌صورت امـواج ساکن است؛ به‌همین‌دلیل الکترونهای همراه اتم باید از قوانین‌خـاصی پیروی کنند. بـار دیگر توجه خواننده را به‌مباحث‌شیمی مقدماتی جلب می‌کنیم، ولی دراینجا فقط چندنکته را به‌اختصار بیان می‌کنیم. درهر اتم، الکترونها حالتهای انرژی خاصی‌دارندکه اربیتال نامیده‌می‌شود. مطابق شکل ۲ــ۱ــ۲ انرژی الکترون دراطراف اتم هیدروژن را به‌روشنی می‌توان تعیین




**شکل ۲-۱-۲** ترازهـای انرژی الکترونهـا (در هیدروژن). الکترون هیدروژن معمولا در پایینترین تراز انرژی قرار می‌گیرد. (دراین تراز، انرژی لازم برای جداکردن الکترون از هسته ۱۳٫۶ eV یا $۲٫۲ \times ۱۰^{-۱۸}$ ژول‌است) الکترونها فقط در ترازهای ویژه‌ای می‌توانند انرژی بیشتری دریافت کنند. بین این‌ترازها شکافهایی وجود دارد، که انرژیهای ممنوع‌اند.

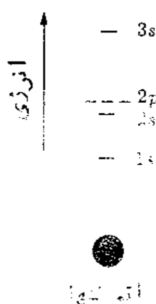
کرد.* نکتهٔ مهم آن است که گستره‌های وسیعی از انرژیهای واسطه در دسترس الکترونها قرار ندارند. اینها انرژیهای‌ممنوع‌اند زیرا بسامدهای مربوط به‌آنها امواج ساکن به‌وجود نمی‌آورند. اگر الکترون اتـم هیدروژن بـاعوامل خارجی تحریك نشده باشد پایینترین اربیتال شکل ۲-۱-۲ را اشغال خواهد کرد.

شکل ۲-۱-۳ طرحوارهٔ انرژی پـایینترین اربیتالهـای سدیم را نشان می‌دهد. هر اربیتال بیش‌از دوالکترون‌نمی‌تواند داشته‌باشد. این‌دو باید چرخش مخالف داشته باشند. دراین حـالت نیز بین اربیتالهـا شکافهای انرژی‌ممنوع وجود دارد کـه الکترونها قادر به‌اشغال آنها نیستند.

ازنظر مـا بالاترین اربیتال اشغال شده چون الکترونهای ظرفیتی را دربر دارد از اهمیت‌ویژه‌ای برخوردار است. این‌الکترونها را می‌توان بامیدان الکتریکی نسبتاً ضعیفی از مدار خارج‌کرد و کاتیونهای مثبت پیشگفته را به‌دست‌آورد. انرژی لازم برای این‌عمل انرژی یونش نام‌دارد. در بخش‌بعد خواهیم‌دیدکه الکترونهای مدار آخر یعنی الکترونهای ظرفیتی در جامدات فلزی ازجا کنده می‌شوند و به جای آنکه تنها بایك اتم پیوند برقرار کنند آزادند تـا در تمام حجم فلز حرکت‌کنند. این‌امـر اساس رسانندگی الکتریکی و گرمایی را تشکیل می‌دهد.

---

* این‌کار با آزمایشهای طیف‌نگاری انجام می‌شود.




اتم سدیم

**شکل ۲-۱-۳** ترازهای انرژی الکترونها (سدیم). چون اتم سدیم یازده الکترون دارد و هر تراز (اربیتالی) تنها می‌تواند دو الکترون داشته باشد، چندین تراز ... بین این اربیتالها شکاف وجود دارد. برای خارج کردن الکترون (ظرفیتی) ... ۵٫۱ الکترون ولت ($۰٫۸۲ \times ۱۰^{-۱۸}$ ژول) لازم است.

وقتی که اربیتالهای ظرفیتی پر نشده‌اند، اتم می‌تواند تعداد ... الکترون اضافی را در این حالتهای انرژی پر نشده بپذیرد و به‌صورت یون منفی یا ... در آید. ... الکترونگاتیو با اربیتالهای ظرفیتی پر نشده نیز می‌توانند الکترون ... این امر که در پیوندهای کووالانسی اهمیت پیدا می‌کند در بخش ... 

**مثال ۲-۱-۱** نقرهٔ استرلینگ تقریباً از ۷٫۵ w/o* مس و ۹۲٫۵ w/o نقره تشکیل شده است. a/o مس و نقره چقدر است؟

حل:

$$\text{مبنا: } ۱۰۰۰۰ \text{ amu آلیاژ} = ۹۲۵۰ \text{ amu Ag} + ۷۵۰ \text{ amu Cu}$$

$$\text{Ag: } ۹۲۵۰ \text{ amu Ag}/(۱۰۷٫۸۷ \text{ amu Ag/اتم}) = ۸۵٫۷۵ \text{ اتم} = ۸۸ \text{ a/o}$$

$$\text{Cu: } ۷۵۰ \text{ amu Cu}/(۶۳٫۵۴ \text{ amu Cu/اتم}) = \frac{۱۱٫۸۰}{۹۷٫۵۵} \text{ اتم} = ۱۲ \text{ a/o}$$

**مثال ۲-۱-۲** جرم الماس کوچکی ۱٫۳ mg است. الف) اگر کربن حاوی ۱٫۱ a/o ایزوتوپ $C^{13}$ باشد، چه‌تعداد اتم $C^{13}$ در آن موجود است. ب) درصد وزنی آن ایزوتوپ چقدر است؟

* درصد وزنی با w/o، درصد اتمی با a/o، درصد خطی با l/o، درصد حجمی با v/o و درصد مولی با m/o نشان داده می‌شود. در فازهای متراکم (مایعات و جامدات) درصد وزنی، و در گازها معمولا درصد حجمی و مولی به‌کار می‌رود، مگر آنکه صریحاً واحد دیگری منظور شود.

حل:

الف)
$$\frac{0/0031\ \text{g}}{(12/011\ \text{g}/0/6022\times10^{24}\ \text{اتم})}=1/55\times10^{20}\ \text{C اتم}$$

$$(1/55\times10^{20})(0/011)=1/7\times10^{18}\ C^{13}\ \text{اتم}$$

ب) مبنا: ۳/۱ mg

$$\frac{\text{جرم کربن ۱۳}}{\text{جرم کل کربن}}=\frac{(1/7\times10^{18})(13\ \text{amu})}{(1/55\times10^{20})(12/011\ \text{amu})}=1/2\ \text{w/o}$$

توضیح. از آنجاکه جرم $C^{13}$ بیشتر از میانگین جرم اتمهاست، درصد وزنی آن از درصد اتمی بیشتر است. ▲

**مثال ۲-۱-۳** با استفاده از پیوست (ب) ترتیب اربیتالی اتم آهن، $Fe^{2+}$ و $Fe^{3+}$، را نشان دهید.

حل: چون ترتیب اربیتالهای آرگون $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$ است بنابراین

$$Fe:\ 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 4s^2 \qquad (2\text{-}1\text{-}1)$$

هنگام یونش ابتدا الکترونهای $4s$ خارج می‌شوند، بنابراین

$$Fe^{2+}:\ 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^6 \qquad (2\text{-}1\text{-}2)$$

$$Fe^{3+}:\ 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^5 \qquad (2\text{-}1\text{-}3)$$
▲

**مثال ۲-۱-۴** ده گرم نیکل را می‌خواهیم برای آبکاری سطح فولادی به‌مساحت $0/8953\ \text{m}^2$ به‌کار بریم. الکترولیت حاوی یون $Ni^{2+}$ است. الف) ضخامت لایهٔ نیکل چقدر خواهد بود؟ ب) اگر بخواهیم این کار را درمدت ۵۰ دقیقه انجام دهیم چه‌جریانی لازم است؟

حل:

الف)

$$10\ \text{g}/(8/9\times10^6\ \text{g/m}^3)(0/8953\ \text{m}^2)=1/25\times10^{-6}\ \text{m}\ (\text{یا}\ 1/25\ \mu m).$$

ب)
$$\left[\frac{10\ \text{g Ni}}{58/71\ \text{g Ni}/0/6\times10^{24}\ \text{اتم}}\right]\times\left[\frac{(\text{۲ الکترون/اتم})(0/16\times10^{-18}\ \text{A.s/الکترون})}{(3000\ \text{s})}\right]=10/9\ \text{آمپر}$$

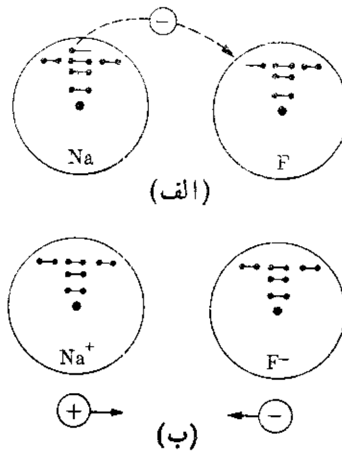
توضیح. دانشجو باید تاکنون با داده‌های موجود در پیوستها آشنا شده باشد. ▲

## ۲-۲ نیروهای پیوندی قوی (پیوندهای اصلی)

از آنجاکه در طرحهای مهندسی بیشتر فراورده‌ها از مواد جامد به‌دست می‌آیند، مطالعهٔ جاذبه‌ای که اتمها را درکنار هم نگه می‌دارد لازم است. برای درك اهمیت مطلب، قطعه‌ای سیم‌مسی را درنظربگیرید. هر گرم ازاین‌سیم شامل ۶۳ر۵۴/$۱۰^{۲۴}$ × ۰ر۶۰۲ اتم است، با توجه به‌چگالی مس هر سانتی‌متر مکعب آن ۹ر۸ برابر این‌عدد یعنی $۱۰^{۲۲}$ × ۸ر۴ اتم ($۸ر۴ \times ۱۰^{۲۸}/m^3$) را دربرمی‌گیرد، دراین‌شرایط‌نیروی‌جاذبه‌ای که‌اتمها را به‌یکدیگر پیوند می‌دهد قوی است. اگر این‌طور نبود اتمها به‌آسانی ازهم جدا می‌شدند؛ فلز تحت بارهای کوچك تغییرشکل‌می‌داد؛ و انرژی گرمایی‌ناشی از ارتعاشهای‌اتمی موجب گازی شدن‌اتمها در دمای پایین‌می‌شد. بدین‌ترتیب، خواص مهندسی هرماده به‌نیروهای بین‌اتمی موجود درآن بستگی دارد.

وجود جاذبه‌های بین اتمی به‌دلیل ساختار الکترونی اتمهاست. گازهای نجیب (بی‌اثر یا ازنظر شیمیایی غیرفعال) مانند هلیم، نئون، و آرگون نسبت به‌دیگر اتمها جاذبهٔ محدودی‌دارند زیرا در اربیتال‌الکترونی خارجی آنها یعنی مدارظرفیتی، آرایش‌پایداری ازهشت‌الکترون (برای‌هلیم ۲ الکترون) وجود دارد. ازطرفی آنها فاقد بارخالص ناشی ازعدم توازن تعداد پروتونها والکترونهایند. سایر عناصر، برخلاف گازهای نجیب، باید به‌یکی از روشهای زیر آرایش پایدار هشت الکترونی را در اربیتالهای خارجی خود به‌وجودآورند: (۱) گرفتن الکترون‌اضافی؛ (۲) ازدست‌دادن الکترون؛ یا (۳) به‌اشتراك گذاشتن الکترون. در دو روش نخست، یونهایی با بار خالص مثبت یا منفی به وجود می‌آید و در نتیجه هر یون نسبت به‌یونهایی‌که بار مخالف دارند جاذبهٔ کولنی خواهد داشت، در روش سوم برای اینکه به‌اشتراك گذاشتن الکترونها عملی‌شود اتحاد کاملی بین اتمهالازم‌است. هرجاکه ممکن‌باشد، این‌سه‌روش پیوندهای قوی یااصلی به‌وجود می‌آورند. برای شکستن این‌پیوندها گاهی ۵۰۰ کیلوژول برمول (یعنی ۵۰۰۰۰۰ ژول برای $۱۰^{۲۴}$ × ۰ر۶۰۲ پیوند) انرژی لازم است. پیوندهای ضعیفتر یا فرعی دیگری (کمتر از ۴۰ کیلو ژول برمول) نیز همواره وجود دارند لکن هنگامی به‌شمار می‌آیند که تنها نیروهای موجود باشند (بخش ۲-۴).

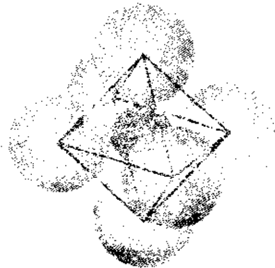
**پیوند یونی.** ساده‌ترین نوع پیوندهای اتمی پیوند یونی است که درنتیجهٔ جاذبهٔ بین بارهای مثبت ومنفی به‌وجود می‌آید. اتمهای عناصری مثل سدیم وکلسیم، که به‌ترتیب یك و دوالکترون در اربیتال ظرفیتی خود دارند، این الکترونها را به‌آسانی رها می‌کنند و به‌صورت یون‌مثبت درمی‌آیند. به‌همین‌ترتیب اتمهای کلرو اکسیژن به‌راحتی به‌الکترونهای اربیتالهای ظرفیتی خود می‌افزایند و با پذیرفتن یك یا دوالکترون، مدار خارجی را هشت الکترونی می‌کنند و به‌صورت یون منفی درمی‌آیند. از آنجا که بین بارهای مثبت و منفی




**شکل ۲-۲-۱** یونش. الف) انتقال الکترون از اربیتال خارجی سدیم به فلوئور؛ ب) یونهای مثبت و منفی حاصل با نیروی کولنی یکدیگر را جذب می‌کنند و پیوند یونی تشکیل می‌دهند.

همواره جاذبهٔ کولنی وجود دارد، همان‌طور که درشکل ۲-۲-۱ طرحوارهٔ آن دیده می‌شود بین یونهای مجاور و ناهمنام نوعی پیوند برقرار خواهد شد.

هر بار منفی نسبت به تمام ذراتی که بار مثبت دارند و هر بار مثبت نسبت به تمام ذراتی که بار منفی دارند دارای جاذبه است. درنتیجه یونهای سدیم تا آنجا که ممکن است بیشترین تعداد یون منفی کلر؛ و یونهای کلر نیز بیشترین تعداد یونهای مثبت سدیم را به‌دور خود جمع می‌کنند، به‌طوری که جاذبه درتمام جهات یکسان است (شکل ۲-۲-۲). شرط اصلی برای ایجاد ماده‌ای با پیوند یونی آن است که تعداد بارهای مثبت با تعداد بارهای



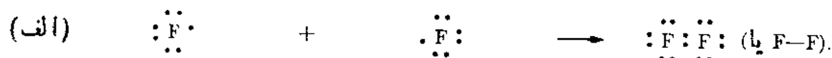
شکل ۲-۲-۲ ساختار سه‌بعدی سدیم کلرید. یون مثبت سدیم با هرشش یون منفی کلر که درمجاورت آن قرار دارند کوئوردینانس شده ونسبت به آنها جاذبهٔ یکسان دارد. (با شکل ۳-۱-۱ مقایسه کنید که در آن، ساختار نشان می‌دهد که یونهای $Na^+$ نیز یونهای $Cl^-$ را احاطه می‌کنند).

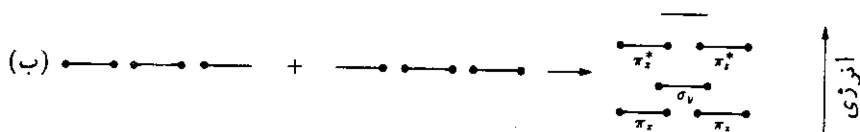
منفی مساوی باشد. بنابراین سدیم‌کلرید ترکیب NaCl و منیزیم‌کلرید ترکیب $MgCl_2$ را دارد، زیرا هراتم منیزیم می‌تواند دوالکترون از پوستهٔ ظرفیتی‌خود خارج کند درحالی که هراتم کلر تنها یك‌الکترون می‌پذیرد.

ازآنجا که این جاذبه‌های کولنی برتمام اتمهای همسایه اثر می‌گذارد موادی که پیوند یونی‌دارند بسیار پایدارند، به‌ویژه اگرشامل‌یونهای چندظرفیتی باشند. مثلا هنگامی که منیزیم و اکسیژن ترکیب می‌شوند و MgO تشکیل می‌دهند، به‌ازای هر $۶٫۰ \times ۱۰^{۲۴}$ یون $Mg^{2+}$ و $۶٫۰ \times ۱۰^{۲۴}$ یون $O^{2-}$ موجود در محصول، ۵۷۰ کیلوژول برمول یعنی ۵۷۰۰۰۰ ژول (یا ۱۳۶۰۰۰ کالری) آزاد می‌شود. بنابراین برای آنکه MgO براین انرژی غلبه‌کند و ذوب‌شود باید دمای آن را تقریباً تا ۲۸۰۰°C (۵۰۰۰°F~)بالا برد.

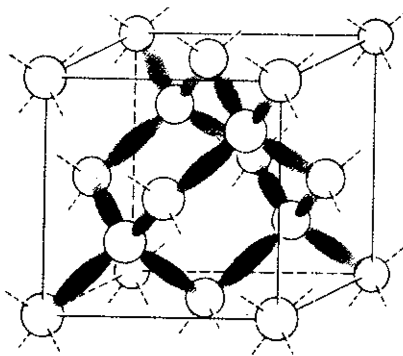
**پیوند کووالانسی.** نوع دیگری از نیروهـای اصلی با جاذبهٔ قوی، پیوند کووالانسی است که درآن الکترونها به‌اشتراك گذاشته می‌شوند. شکل ۲ـ۲ـ۳ این اشتراك را برای دواتم فلوئور در $F_2$ به‌دوطریق نشان‌می‌دهد. دربسیاری ازموارد تصویر اول (نقاطی‌که الکترون را نشان می‌دهند یا «خط پیوند») برای منظور مـا کافی است. مثلا شکل ۲ـ۲ـ۴ (الف) درمورد کربن. بااین‌حال باید توجه داشت‌که محل الکترونها دقیق نیست و با عدم قطعیت همراه است. بنابراین، این تصویر همیشه رضایت‌بخش نیست، شق دیگر، شکل طرحـوار ۲ـ۲ـ۴ (ب) است‌که برای نشان‌دادن مکانی‌که احتمال‌وجود جفت الکترونهای به‌اشتراك گذاشته شده درآن بیشتراست از ناحیهٔ سایه‌زده استفاده شده است.

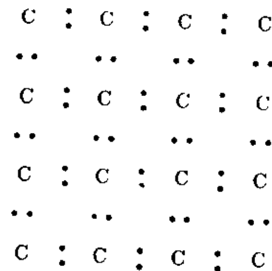
شکل ۲ـ۲ـ۳ (ب) به‌انرژی الکترونهای ظرفیتی (اربیتال $p$ ۲) فلوئور که با هم ترکیب شده و اربیتال مولکولی تشکیل می‌دهند اختصاص دارد. یادآوری می‌شودکه‌وقتی از دواتم مجزا مولکولی تشکیل می‌شود، انرژی متوسط الکترونهای مدار آخر یاظرفیتی افت می‌کند. بنابراین پیوند کووالانسی را می‌تـوان برحسب انرژی درنظر گرفت، زیرا برای انجام عکس واکنشی‌که شکل ۲ـ۲ـ۳ (ب) نشان می‌دهد، انرژی لازم است.




**شکل ۲ـ۲ـ۳** پیوند کووالانسی (فلوئور). الف) معمولا برای ساده‌ترشدن مطلب ازنقاطی که الکترون را نشان می‌دهند یـا از خط پیوند استفاده مـی‌شود؛ ب) ترازهای انرژی اربیتالی (طرحواره). برای شکستن یك‌مـول ($۶٫۰ \times ۱۰^{۲۴}$ عدد) از این پیوندهـا ۱۶۰۰۰۰ ژول (۳۸۰۰۰ کالری) انرژی لازم است. [قسمت (ب) تنها الکترونهای $2p$ را نشان می‌دهد.]





(ب) (الف)

**شکل ۲-۲-۴** ساختار الماس. استحکام پیوندهای کووالانسی سختی زیاد الماس را توجیه می‌کند. الف) نمایش دو بعدی؛ ب) نمایش سه‌بعدی، پیوند به‌شکل ناحیه‌ای نشان داده شده است که احتمال وجود الکترون در آن زیاد است (سایه زده‌شده).

این امر که پیوندهای کووالانسی نیروی جاذبه‌ای قوی بین اتمها ایجاد می کنند در مورد الماس کاملا مشهود است. الماس سخت‌ترین ماده‌ای است که درطبیعت یافت می‌شود و تماماً کربن است. هر کربن چهارالکترون ظرفیتی داردکه با اتمهای همسایه به‌اشتراك گذاشته می‌شوند تاشبکه‌ای سه‌بعدی که به‌طور کامل باجفتهای کووالانسی پیوند یافته است، تشکیل شود (شکل ۲-۲-۴). تنها سختی الماس نیست که استحکام پیوند کووالانسی را نشان می‌دهد؛ بلکه الماس را باید تا دمای فوق‌العاده بالایی (بیش‌از $3000\ ^\circ C$) گرم کنیم تا انرژی گرمایی، ساختار آن را ازهم بپاشد (یعنی ذوب شود).*

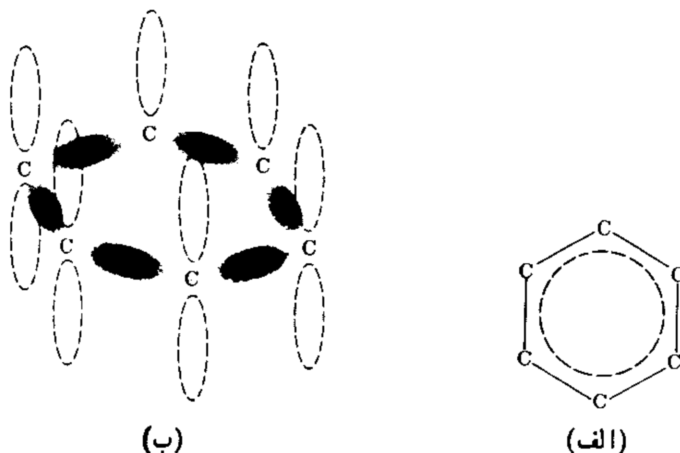
برخلاف‌جاذبه‌های کولنی که تاجایی‌که فضای‌اطراف اجازه‌می‌دهد یونهای‌ناهمنام را به‌همسایگی خودمی‌آورند، پیوندهای کووالانسی بین اتمهای خاصی تشکیل می‌شوند. درشبکهٔ‌الماس [شکل ۲-۲-۴ (ب)] تعداد پیوندهاست‌که تعداداتمهای همسایه را محدود می‌کند نه‌فضای موجود. در شکل ۲-۲-۳ دو اتم فلوئور با پیوند کووالانسی ۱۶۰ کیلو ژول بر $0.6 \times 10^{24}$ پیوند. به‌یکدیگر متصل شده‌اند؛ با این‌حال هیچ‌یك از این دواتم نسبت به‌سایر اتمهای فلوئور (یا مولکولهای دیگر فلوئور) آنچنان جاذبه‌ای ندارند که موجب به‌هم نزدیك‌شدن آنها بشود. به‌همین‌دلیل $F_2$ در $85\ K$ (یعنی $-188\ ^\circ C$ یا $-360\ ^\circ F$) تنها با گرفتن $3\ kJ\sim$ برمول تبخیر و به گاز تبدیل‌می‌شود. اگر پیوند تنها به‌یك جفت اتم معین مربوط شود، واژهٔ فضاویژه به‌کار می‌رود و بنابراین جهتدار است.

---

* برای شکستن تمام پیوندهای یك‌مول اتم کربن ($0.6 \times 10^{24}$) حدود ۵۷۰ کیلوژول، یا ۱۸۰ کیلوکالری، انرژی لازم است.

استثنایی که در مورد فضاویژگی پیشگفته، در پیوندهـای کووالانسی دیده می‌شود ترکیباتی‌اند که یك حلقهٔ بنزن دارند و در بـارهٔ آنها در کتابهای شیمی بحث شده است. (شکل ۲ــ۲ــ۵). ازهر اتم کربن یك‌الکترون (درمجموع شش‌الکترون) ازجا کنده می‌شود، احتمال وجود این‌شش‌الکترون در اطراف‌حلقه درهر نقطه‌ای یکسان است.* این‌الکترونها براثر میدانهای الکتریکی متناوب از یك طرف مـولکول به‌طرف دیگر حرکت می‌کنند ولی (بجز در شرایط غیرعادی فاجعه‌آمیز) نمی‌توانند مولکول را ترك کنند. برای هریك ازاین‌الکترونهای ازجـا کنده شده، به‌تعداد اتمهای موجود در حلقه، الگوی موجی وجود دارد.

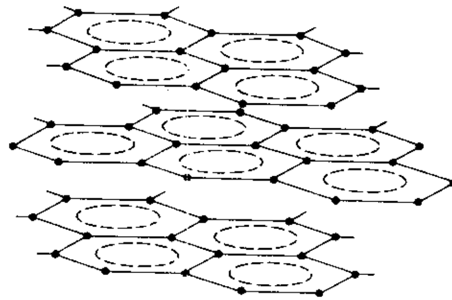
**پیوند فلزی.** علاوه بر پیوند یونی و کووالانسی، نوع‌سوم مکانیسم جذب بین اتمی اصلی، پیوند فلزی است. ساختن الگوی پیوندفلزی به‌سادگی دوپیوند دیگر نیست. اما برای این منظور می‌توان از مفهوم الکترونهای آزاد که درپاراگراف قبل شرح دادیم، استفاده‌کرد. نخست گرافیت را درنظربگیرید (شکل ۲ــ۲ــ۶)؛ که درآن (علاوه برجفتهای الکترونی که بین اتمهای معینی وجـود دارند) لایه‌های اتمهای کربن نیز حـاوی الکترون آزادند. الکترونهای ازجاکنده شده می‌توانند به‌میدانهای الکتریکی پاسخ دهند و به‌صورت موجی




**شکل ۲ــ۲ــ۵** الکترونهای ازجاکنده شده، الف) حلقهٔ بنزن؛ ب) اربیتال بین اتمهای کربن فضاویژه است. الکترونهای سایر اربیتالها در مواجهه بامیدان الکتریکی داخلی یا خارجی می‌توانند درون مولکول حرکت‌کنند و آزادند. (برای سادگی، اتمهای هیدروژنی که درصفحهٔ اتمهای کربن وجود دارند رسم نشده است.)

---

* این الکترونها در پیوندهای $\pi$، که عمود برصفحهٔ مولکول‌اند، شرکت می‌کنند.

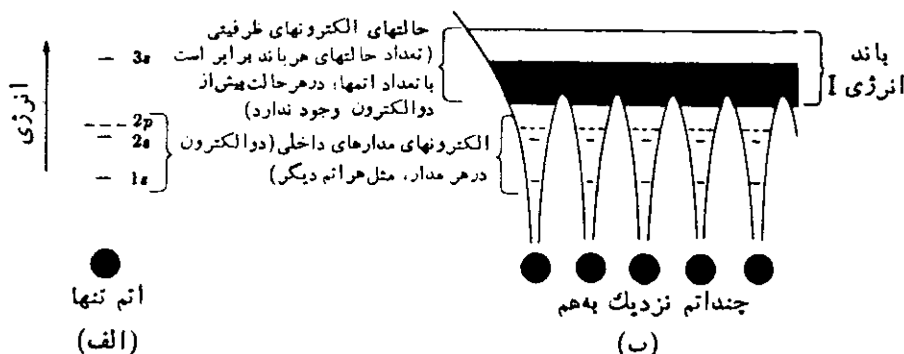


**شکل ۲ـ۲ـ۶** الکترونهای آزاد درصفحات گرافیت [هرلایهٔ «چندین حلقهٔ بنزن دارد» (شکل ۲ـ۲ـ۵)]. رسانندگی درجهت افقی بیش از ۱۰۰ برابر جهت عمودی است.

در داخل صفحات گرافیت حرکت کنند.* در واقع رسانندگی هنگامی میسر خواهد بود که الکترودی مثبت برای خارج کردن الکترونها ازیك سرلایه، وجود داشته باشد والکترودی منفی در دسترس باشد تا الکترونهایی را که بهسردیگر میرود، تأمین کند.

فلزات الکترونهای آزادی دارند که درسه جهت میتوانند حرکت کنند. بنا براین معمولا از واژهٔ «ابر الکترونی» یا «گاز الکترونی» صحبت میشود، زیرا الکترونهای مدار خارجی که پیوند آنها استحکام کمتری دارد میتوانند آزادانه در ساختار فلز حرکت کنند. طرحوارهٔ اربیتالهای فلزات در شکل ۲ـ۲ـ۷ برای سدیم رسم شده است. همچنانکه اربیتالهای مولکولی $F_2$ در طرف راست شکل ۲ـ۲ـ۳ (ب) را توسط اربیتالهای اتمی شرح دادیم، ترازهای انرژی سدیم چنداتمی با انرژی اربیتالهای یك اتم مجزا، کهدرشکل ۲ـ۱ـ۳ شرح دادیم، متفاوت است. اختلاف عمدهٔ شکل ۲ـ۲ـ۷ (الف) با ۲ـ۲ـ۷ (ب) آن است که در آن، اربیتال ظرفیتی خارجی بهترازهایی، مساوی با تعداد اتمهای موجود درسیستم، تقسیم شدهاست لازم بهتذکر است که میانگین انرژی الکترونهای آخرین مدار یا ظرفیتی شکل ۲ـ۲ـ۷ (ب) کمتر از انرژی اربیتال 3s برای اتمهای تکی است و این امر، پیوند را در فلزات توجیه میکند. بهطور خلاصه برای غلبه برپیوند فلزی و جداکردن اتمها ازیکدیگر وتولیدمجدد اربیتالهای اتمی مجزا، انرژی لازم است. برایمثال ازنظر کیفی میتوان پیوندقوی اتمهای تنگستن را نام برد. نقطهٔ ذوب ونقطهٔ جوش آن بسیار بالاست. (بهترتیب $3400\ ^\circ C$ و $5900\ ^\circ C$ است.) همچنین مدول کشسانی فوقالعاده زیادی دارد (۳۴۵۰۰۰ MPa، برای مقایسهٔ پیوست (ج) را ببینید). درمقابل،

* همچنانکه درمورد حلقهٔ بنزن گفته شد، تعداد الگوهای موجی مساوی تعداد اتمهای کربن در لایهٔ افقی است. توجه داشته باشید که چون الکترونهای آزاد تنها درصفحات افقی حرکت میکنند، برای حرکت آنها از یك لایه بهلایههای اتمی دیگر، مکانیسم حرکتی وجود ندارد. (سؤال ۲۶ را درآخر فصل ببینید.)




**شکل ۲-۲-۷** الکترونهای ظرفیتی درفلز (سدیم). الکترونهای ظرفیتی که آزاد ومتحرك‌اند در یك بـاند انرژی قرار مـی‌گیرند، این الکترونها قـادرند درتمام نقاط فلز حرکت کنند الکترونهای ظرفیتی تنها نیمهٔپایینی باند را پرمی‌کنند. انرژی میانگین انرژی الکترونهای ۳s دریك اتم تنها کمتر است، پیوند فلزی ناشی ازهمین اختلاف انرژی است.

ازنقطهٔ ذوب‌پایین سدیم (۹۷٫۸ °C) و نرم بودن آن معلوم می‌شود که پیوندهای ضعیفی دارد. هر دوفلز الکترونهای آزاد دارندکه سبب رسانش الکتریکی و گرمایی می‌شود.

قبل‌از آنکـه در این‌بخش پیرامون پیوندهـای اصلی، یـا نیروهـای جاذب قوی نتیجه‌گیری‌کنیم، بایدبگوییم، درحالتی که نوعی پیوند در سراسر ماده وجود دارد انواع دیگر پیوند نیز می‌تواند موجود باشد بنابراین انواع پیوندهای مخلوط متداول‌اند.

**مثال ۲-۲-۱** پیوند کـووالانسی بین دواتم‌کربن C—C، برابر ۳۷۰ کیلو ژول برمول (۸۸ کیلو کالری بر $۱۰^{۲۴} \times ۰٫۶$ پیوند) است. انرژی نور از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید

$$E = h\nu \qquad (۲-۲-۱)$$

که‌درآن $h$ ثابت پلانك ($۱۰^{-۳۳} \times ۰٫۶۶$ ژول‌ـ‌ثانیه) و $\nu$ بسامدنور است. برای‌شکستن یك پیوند C—C چه‌طول موجی لازم است؟

حل:

$$۳۷۰۰۰۰\ \mathrm{J}/۰٫۶ \times ۱۰^{۲۴} = (۰٫۶۶ \times ۱۰^{-۳۳}\ \mathrm{J} \times \mathrm{s})\nu$$

$$\nu = ۹٫۳۴ \times ۱۰^{۱۴}/\mathrm{s} = c/\lambda$$

که درآن $c$ سرعت نور است.

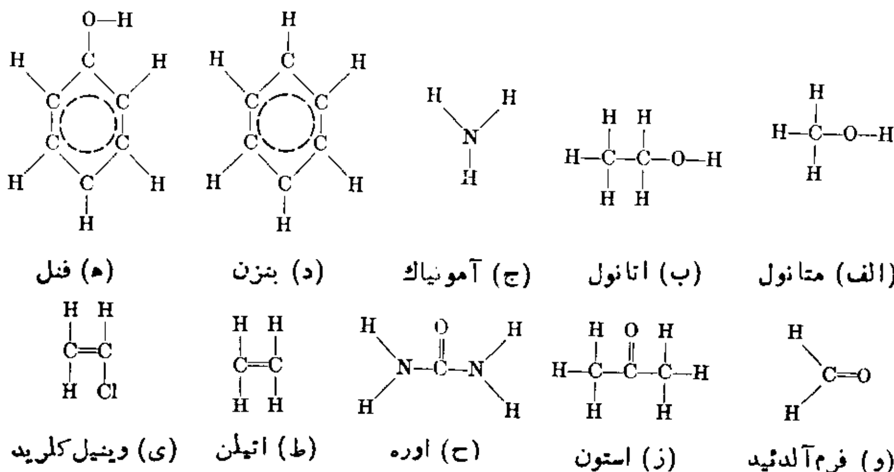
$$\lambda = (۰٫۲۹۹ \times ۱۰^{۹}\ \mathrm{m/s})(۹٫۳۴ \times ۱۰^{۱۴}/\mathrm{s})$$
$$= ۰٫۳۲۰ \times ۱۰^{-۶}\ \mathrm{m}(= ۳۲۰\ \mathrm{nm})$$

توضیح. این‌طول‌موج در گسترهٔ نورفرابنفش‌است. به‌همین‌دلیل نورفرابنفش‌می‌تواند سبب فاسدشدن پلاستیکهایی‌که پیوند کووالانسی $C-C$ دارند، شود. ▲

## ۲-۳ مولکولها

مولکول را می‌توان به‌عنوان گروهی ازاتمها تعریف‌کردکه بین آنها پیوندی قوی برقرار است، اماپیوند این‌گروه باگروههای مشابه نسبتاً ضعیف‌است. نخستین مولکول موردبحث $F_2$ است‌که دربخش‌قبل شرح داده‌شد. یادآوری می‌شودکه برای شکستن پیوندکووالانسی بین دواتم آن ۱۶۰ کیلوژول برمول (تقریباً ۱٫۶۵ الکترون‌ولت برای هرپیوند) انرژی لازم است (شکل ۲-۲-۳). در مقابل برای جدا کردن مولکولها وگازی شدن در هنگام جوش، تنها ۳ کیلو ژول برمول (۰٫۰۳ الکترون ولت برای هرپیوند) کافی است.

معمولترین مثال در این مورد ترکیباتی مثل $H_2O$، $CO_2$، $CCL_4$، $O_2$، $N_2$، و $HNO_3$ است مولکولهای‌کوچك دیگری نیز درشکل ۲-۳-۱ دیده می‌شود. در هریك از این مولکولها، پیوندهایی قوی اتمها را به هم متصل می‌کند که معمولا پیوند کووالانسی است، گرچه‌پیوند یونی نیزمعمول است. برخلاف نیرویی‌که اتمها را به‌هم‌نزدیك‌می‌کند، پیوند بین‌مولکولها ضعیف‌است ودرنتیجه هرمولکول کم‌وبیش‌آزاد است‌که به‌طورمستقل عمل‌کند. این مطالب از حقایق زیر سرچشمه گرفته‌اند: ۱) درمقایسهٔ با سایر مواد هریك ازاین ترکیبات مولکولی نقطهٔ ذوب و نقطهٔ جوش پایینی دارند؛ ۲) جامدات مولکولی نرم‌اند زیرا مولکولها بااعمال‌اندکی‌تنش‌روی‌هم‌می‌لغزند؛ ۳) مولکولهامی‌توانندبه‌حالت مایع یاگاز باقی بمانند.



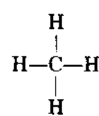

**شکل ۲-۳-۱** مولکولهای آلی‌کوچك. هراتم کربن با چهار پیوند، هر نیتروژن با سه‌پیوند، هراکسیژن با دوپیوند، و هرهیدروژن یا کلر بایك پیوند احاطه شده است.

مولکولهایی که در بالا نام برده شد نسبتاً کوچك‌اند، مولکولهای دیگر از تعداد زیادی اتم تشکیل شده‌اند. مثلا مولکول پنتاتری اکتنان (که در شکل ۲ـ۳ـ۲ (ج) دیده می‌شود) بیش‌از ۱۰۰ اتم‌دارد و بعضی از مولکولها بیش‌ازچندهزار اتم‌را شامل‌می‌شوند. در هرصورت چه‌مولکول کوچك باشد مثل $CH_4$، و چه بزرگتراز آنچه که در شکل ۲ـ۳ـ۲ (ج) نشان داده شده، تفاوت بین پیوندهای درون مولکولی قوی و پیوندهای بین مولکولی ضعیفتر، هنوز وجود دارد.

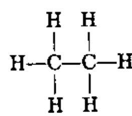
مواد دیگری از قبیل فلزات، $MgO$، $SiO_2$ و پلاستیکهای فنل فرم‌آلدئید ساختار پیوستهٔ سه‌بعدی با پیوند اصلی دارند. اختلاف ساختار بین‌مواد مولکولی و موادی‌که ساختار آنها در هرسه جهت پیوند اصلی دارد، موجب تفاوت اساسی در خواص می‌شود.

**انرژی و طول پیوندها.** استحکام پیوند بین اتمهای یك‌مولکول به‌نوع اتمها و به‌دیگر پیوندهای اطراف بستگی دارد. در جدول ۲ـ۳ـ۱ طول پیوند و انرژی برخی از زوج اتمهایی‌که معمولا درساختار مولکولی با آنها برخورد می‌کنیم، گردآوری شده است. انرژی ذکرشده درجدول، مقدار لازم‌برای شکستن یك‌مول (عدد آووگادرو) پیوند است. مثلا برای شکستن $۰٫۶۰۲ \times ۱۰^{۲۴}$ پیوند $C-C$، ۳۷۰۰۰۰ ژول انرژی لازم است یا برای‌هرپیوند$(۰٫۶۰۲ \times ۱۰^{۲۴})/۳۷۰۰۰۰$ ژول. به‌همین ترتیب هنگام تشکیل یکی از این پیوندهای $C-C$ همان مقدار انرژی ($-۰٫۶۱ \times ۱۰^{-۱۸}$ ژول) آزاد می‌شود، فقط علامت آن تغییر می‌کند.

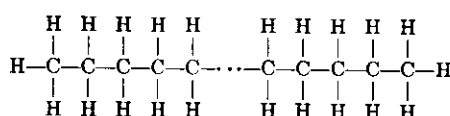
**زاویه‌های پیوند.** دربعضی ترکیبات کووالانسی اربیتالهای هیبریدی را می‌توان تشخیص داد و آن‌هنگامی است که‌اربیتالهای $s$ و $p$ ملغمه شده‌باشند. مهمترین هیبرید اربیتال $sp^3$ است که درشکل ۲ـ۲ـ۴ برای‌چهار پیوندکربن در الماس رسم‌شده و به‌جای اربیتالهای جداگانهٔ $2s$ و $2p$ که در اتمهای تنها به‌وجود می‌آیند، [مثل اتمهای تنهای سدیم وفلوئور در شکل ۲ـ۲ـ۱ (الف)]، چهار اربیتال مساوی تشکیل شده است. متان ($CH_4$) وکربن تتراکلرید ($CCl_4$) مانند الماس اربیتال $sp^3$ دارندکه چهار اتم یکسان را به‌کربن مرکزی متصل‌می‌کند. بنابراین بافاصله‌های‌مساوی دراطراف کربن مرکزی قرار گرفته‌اند



(الف) متان



(ب) اتان



(ج) $C_{35}H_{72}$، پنتاتریاکنتان (یعنی ۳۵ـآن)

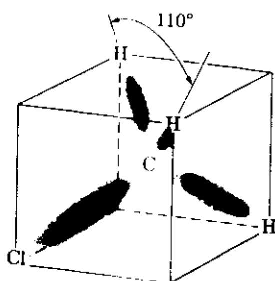
**شکل ۲ـ۳ـ۲** مثالهایی از مولکولها. مولکولها گروههایی از اتمهایند. پیوندهای اصلی، اتمهای هرمولکول را در مجاورت هم نگه می‌دارد و نیروهای ضعیفتر فرعی موجب می‌شود که مولکولها یکدیگر را جذب کنند.

**جدول ۲-۳-۱ انرژی و طول پیوندها**

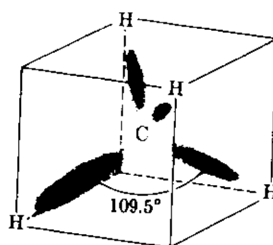
| پیوند | انرژی پیوند* | | طول پیوند |
|---|---|---|---|
| | kcal/mole | kJ/mole | nm |
| C−C | ۸۸** | ۳۷۰** | ۰ر۱۵۴ |
| C=C | ۱۶۲ | ۶۸۰ | ۰ر۱۳ |
| C≡C | ۲۱۳ | ۸۹۰ | ۰ر۱۲ |
| C−H | ۱۰۴ | ۴۳۵ | ۰ر۱۱ |
| C−N | ۷۳ | ۳۰۵ | ۰ر۱۵ |
| C−O | ۸۶ | ۳۶۰ | ۰ر۱۴ |
| C=O | ۱۲۸ | ۵۳۵ | ۰ر۱۲ |
| C−F | ۱۰۸ | ۴۵۰ | ۰ر۱۴ |
| C−Cl | ۸۱ | ۳۴۰ | ۰ر۱۸ |
| O−H | ۱۱۹ | ۵۰۰ | ۰ر۱۰ |
| O−O | ۵۲ | ۲۲۰ | ۰ر۱۵ |
| O−Si | ۹۰ | ۳۷۵ | ۰ر۱۶ |
| N−H | ۱۰۳ | ۴۳۰ | ۰ر۱۰ |
| N−O | ۶۰ | ۲۵۰ | ۰ر۱۲ |
| F−F | ۳۸ | ۱۶۰ | ۰ر۱۴ |
| H−H | ۱۰۴ | ۴۳۵ | ۰ر۰۷۴ |

* مقادیر تقریبی. این مقادیر با تغییر نوع پیوندهای مجاور تغییر می‌کند. مثلا متان ($CH_4$) برای پیوند C−H خود مقدار بالا را دارد ولی در $CH_3Cl$ انرژی پیوند C−H ۵٪ از این مقدار کمتر است و در $CHCl_3$ ۱۵٪ کمتر.

** در تشکیل پیوند تمام این مقادیر منفی‌است، (انرژی آزاد می‌شود) و برای شکستن پیوند مثبت است (انرژی می‌گیرد).




(ب)

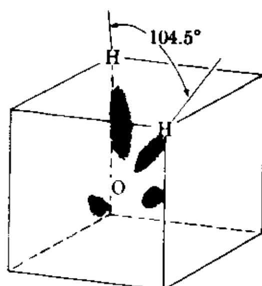



(الف)

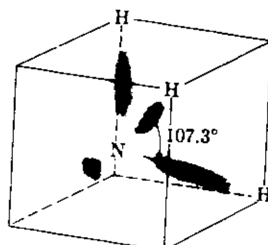
**شکل ۲-۳-۳** زاویه‌های پیوند. الف) متان، $CH_4$، نسبت به‌شش زاویه به‌طور یکسان ۱۰۹٫۵ درجه تقارن دارد؛ ب) کلرومتان، $CH_3Cl$، که کج و نامتقارن است.

و با یکدیگر زوایای ۱۰۹٫۵ درجه می‌سازند.* ازنظر هندسی مثل آن است که یك کربن در مرکز مکعبی قرار گیرد و اربیتالها به‌طرف چهار گوشه از ۸ گوشهٔ مکعب کشیده شده باشند [شکل ۲-۳-۳ (الف)]. با این‌حال اگر اربیتالها اتمهای غیرمشابهی را به‌کربن مرکزی پیوند دهند، همان‌طور که برای $CH_3Cl$ دیده می‌شود [شکل ۲-۳-۳ (ب)]، زوایا اندکی تغییر خواهدکرد.

اعوجاج بیشتر دراربیتالهای هیبریدی هنگامی اتفاق می‌افتدکه بعضی از الکترونها به‌جای شرکت درپیوند کووالانسی، به‌صورت جفت الکترون تنها وجود داشته باشند. این امر به‌ویژه درمورد $NH_3$ و $H_2O$ (شکل ۲-۳-۴) که مقادیر میانگین زمانی آنها




(ب)

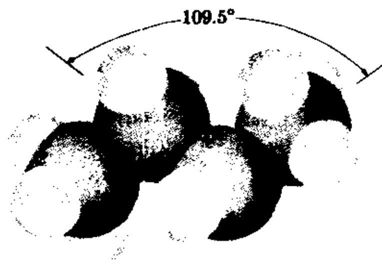



(الف)

**شکل ۲-۳-۴** زاویای پیوند. الف) آمونیاك، $NH_3$؛ و ب) آب. زوایایی بین °۱۰۹٫۵ شکل ۲-۳-۳ (الف) و °۹۰ دارد. آمونیاك یك‌جفت الکترون تنها وآب دوجفت دارد.

---

* زاویهٔ H—C—H در $CH_4$ به‌دلیل‌ارتعاشات گرمایی‌دائماً در تغییراست و ۱۰۹٫۵ درجه میانگین زمانی‌آن است.

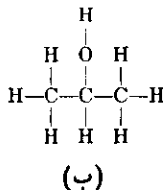



**شکل ۲ـ۳ـ۵** زوایای پیوند (بوتان). با وجودآنکه معمولا زنجیرها را بهصورت خط راستمی‌کشیم [شکل ۲ـ۳ـ۲ (ج) و ۲ـ۳ـ۷ (ب)] زاویهٔ پیوند C—C—C حدود ۱۰۹ درجه است.

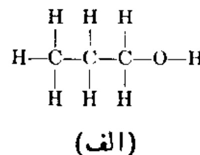
بهترتیب ۱۰۷٫۳ و ۱۰۴٫۵ درجه است آشکار می‌شود.

یکی از زوایای پیوندی که غالباً در مطالعهٔ مواد برآن برخورد می‌کنیم، زاویهٔ C—C—C در زنجیر هیدروکربنها است (شکل ۲ـ۳ـ۵). اگرچه برحسب وجود هیدروژن یا رادیکال جانبی دیگر (مقدار این زاویه اندکی تغییر می‌کند) ولی می‌توان زاویهٔ C—C—C را نزدیك به ۱۰۹٫۵ درجه فرض کرد.

**ایزومرها.** در مولکولهایی‌که ترکیب یکسان‌دارند بیش‌از یك‌آرایش اتمی ممکن است. شکل ۲ـ۳ـ۶ این‌امر را برای الکل پروپیل والکل ایزوپروپیل نشان می‌دهد. درترکیب شیمیایی معین، ساختارهای مولکولی‌متفاوت ایزدمر نامیده‌می‌شوند و ازآنجاکه این‌تغییرات ساختاری روی قطبیت مولکولی اثر می‌گذارد (بخش ۲ـ۴)، در خواص حاصل نیز مؤثر است. مثلا دمای‌ذوب و جوش الکل پروپیل به‌ترتیب $-127\,^\circ C$ و $97.2\,^\circ C$ است، در حالی‌که برای الکل ایزوپروپیل این دماها برابرند با $-89\,^\circ C$ و $82.3\,^\circ C$.




(ب)




(الف)

**شکل ۲ـ۳ـ۶** ایزومرهای پروپانول. الف) الکل پروپیل معمولی؛ ب) الکل ایزوپروپیل مولکولها ترکیب یکسان و ساختارهای‌متفاوت دارند. درنتیجه خواص آنها متفاوت است. آن را باچندشکلی مواد بلوری (بخش ۳ـ۴) مقایسه کنید.

**مثال ۲ـ۳ـ۱** از تبدیل ۷۰ گرم اتیلن [شکل ۲ـ۳ـ۷ (الف) به پلی اتیلن [شکل ۲ـ۳ـ۷ (ب)] چقدر انرژی آزاد می‌شود؟

حل: هر مولکول $C_۲H_۴$ افزوده شده یك پیوند $C=C$ را می‌شکند و دو پیوند $C-C$ تشکیل می‌دهد. با استفاده از جدول ۲ـ۳ـ۱:

$$\frac{+۶۸۰۰۰۰\ J}{۰٫۶۰۲\times ۱۰^{۲۴}\ \text{مولکول}}-\frac{۲(۳۷۰۰۰۰\ J)}{۰٫۶۰۲\times ۱۰^{۲۴}\ \text{مولکول}}$$

$$=-۹٫۹۶\times ۱۰^{-۲۰}\ J/C_۲H_۴$$

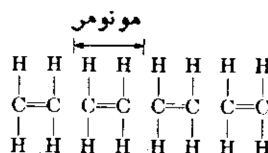
$$۷۰\ g(۰٫۶۰۲\times ۱۰^{۲۴}\ amu/g)/(۲۸\ amu/C_۲H_۴)=۱٫۵\times ۱۰^{۲۴}C_۲H_۴$$

$$(-۹٫۹۶\times ۱۰^{-۲۰}\ J/C_۲H_۲)(۱٫۵\times ۱۰^{۲۴}\ C_۲H_۴=-۱۵۰۰۰۰\ J$$

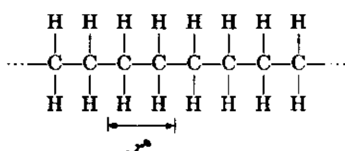
یا

$$-۱۵۰۰۰۰\ J(۰٫۲۳۹\ cal/J)=-۳۶\ kcal$$

توضیح. به‌طور قراردادی انرژی لازم با علامت (+) و انرژی آزاد شده با علامت (−) مشخص می‌شود. واکنش شکل ۲ـ۳ـ۷ اساس ساخت مولکولهای نوع وینیل است که در پلاستیکها مصرف می‌شوند. (فصل ۷). ▲



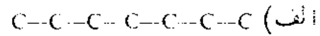

(الف)

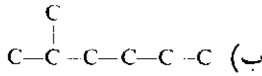


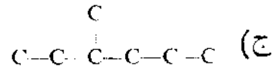

(ب)

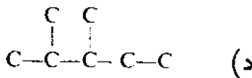
**شکل ۲ـ۳ـ۷** پلی‌مر کردن افزایشی اتیلن. الف) مونومرهای اتیلن؛ ب) پلی‌مر با تعدادی مر یا واحد $C_۲H_۴$. پیوند دوگانهٔ اتیلن شکسته می‌شود تا دو پیوند ساده تشکیل شود و مرهای مجاور را اتصال دهد.

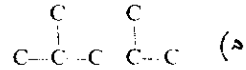
**مثال ۲ـ۳ـ۲** ایزومرهای مختلف هپتان، $C_۷H_{۱۶}$ را باشکل نشان دهید (فقط اتمهای کربن را نشان دهید)

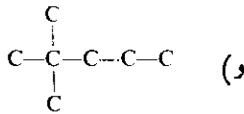
الف) 

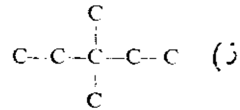
ب) 

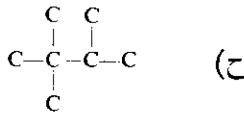
ج) 

د) 

ه) 

و) 

ز) 

ح) 

توضیح. سایر آرایشها مثل C—C—C—C (با دو شاخهٔ C روی کربن دوم) مشابه یکی‌ازصورتهای بالاست (دراین مورد شکل (ز)). ▲

## □ ۲-۴ نیروهای پیوندی فرعی *

سه‌نوع پیوندی‌که دربخش (۲-۲) بررسی شد همگی پیوندهای اصلی نسبتاً قوی‌اند کـه اتمها را درمجاورت هم‌نگه می‌دارند. پیوندهای ضعیفتر فرعی نیز سبب جاذبهٔ بین اتمی می‌شوند وباوجود آنکه‌چندمکانیسم مختلف‌دارند، به‌طور کلی به‌عنوان نیروهای‌واندروالس شناخته شده‌اند. اگر نیروهای وانــدروالس در بعضی مــوارد تنها نیروهای اعمال شونده نبودند، از مطرح‌کردن آنها چشمپوشی می‌کردیم.

در گاز نجیبی مثل هلیم اربیتال اولیه با دو لکترون پرشده است؛ و درسایرگازهای نجیب مثل‌نئون وآرگون اربیتالهای ظرفیتی باهشت‌الکترون تکمیل شده‌اند. دراین‌حالات پایدار هیچ‌یك ازپیوندهای اصلی‌نمی‌توانند مؤثر باشند، زیرا پیوندهای‌یونی، کووالانسی و فلزی هرسه‌به‌تنظیم الکترونهای ظرفیتی نیاز دارند. درنتیجه اتمهای این گازهای نجیب نسبت به‌هم جاذبهٔ اندکی‌دارند وبجز درچند مورد استثنایی، در دماهای معمولی به‌صورت تك‌اتمی باقی می‌مانند. تنها در دماهای فوق‌العاده پایین‌که ارتعاشات گرمایی کاهش یافته است این‌گازها متراکـم می‌شوند [جدول ۲-۴-۱ (الف)] و همین تراکم است‌که نشان می‌دهد بین اتمها جاذبه ضعیفی وجود داردکه آنها را به‌طرف یکدیگر می‌کشاند.

شواهد دیگری وجود دارد که نشان می‌دهد بین مولکولهای جدول ۲-۴-۱ (ب) نیزچنین جاذبه‌های‌ضعیفی وجود دارد. همان‌طورکه قبلا گفته شد، اتمهای این گازها مدار ظرفیتی خود را باپیوند کووالانسی درون مولکول کامل می‌کنند. تراکم چنین مولکولهایی تنها درصورتی میسر است‌که انرژی ارتعاشات‌گرمایی به‌اندازهٔ کافی‌کاهش‌یابد ونیروهای ضعیف واندروالس فعال شوند.

---

* مطلبی را که درمقدمه درمورد علامت مربع توخالی آمده ببینید.

**جدول ۲-۴-۱** دمای ذوب و جوش گازها. (دمای مطلق)

| (الف) گازهای نجیب | | | (ب) مولکولهای ساده | | |
|---|---|---|---|---|---|
| گاز | دمای ذوب K | دمای جوش K | مولکول | دمای ذوب K | دمای جوش K |
| | | | قرینه | | |
| He | ۰٫۹۶* | ۴٫۲۵ | $H_2$ | ۱۴٫۰۲ | ۲۱ |
| Ne | ۲۴٫۵ | ۲۷ | $N_2$ | ۶۳ | ۷۸ |
| Ar | ۸۴ | ۸۷٫۵ | $O_2$ | ۵۵ | ۹۰ |
| Kr | ۱۱۶ | ۱۲۰ | $CH_4$ | ۸۸ | ۱۴۵ |
| Xe | ۱۶۱ | ۱۶۶ | $CCl_4$ | ۲۵۰ | ۳۴۹ |
| Rn | ۲۰۲ | ۲۱۱ | $C_4H_{10}$ | ۱۳۵ | ۲۷۴ |
| | | | قطبی | | |
| | | | $NH_3$ | ۱۹۵ | ۲۴۰ |
| | | | $CH_3Cl$ | ۱۱۳ | ۲۵۹ |
| | | | $H_2O$ | ۲۷۳ | ۳۷۳ |

* نقطهٔ ذوب در فشار ۲۶ اتمسفر. در فشار یك اتمسفر تا نزدیك بهصفر درجهٔ کلوین (C° ۱۶ر۲۷۳ −) هلیم بهصورت مایع باقی میماند.

**دوقطبیهای القایی.** بهاستثنای سه مورد آخر، تمام گازها و مولکولهای جدول ۲-۴-۱ متقارناند یعنی در هردورهٔ طولانی مرکز بارهای مثبت پروتونها و مرکز بارهای منفی الکترونها در مرکز مولکول (یا اتم گاز نجیب) واقع است. اما در لحظاتی ممکن است حرکات الکترونی و ارتعاشات اتمی این تقارن الکتریکی را برهم زنند. در این صورت دوقطبی الکتریکی کوچکی حاصل میشود. در هرکسری از ثانیه* مراکز بارهای مثبت و منفی برهم منطبق نیستند، بنابراین دوقطبی الکتریکی بهوجود خواهد آمد و یك انتهای مولکول را مثبت و انتهای دیگرش را منفی خواهد کرد. میدان الکتریکی اندکی که بهوجود میآید بهنوبهٔ خود موجب جابهجایی الکترونها در مولکولهای مجاور و ایجاد دوقطبی در آنها میشود، ولی نیروهای جاذبهٔ حاصل ضعیفاند. طبق دادههای جدول ۲-۴-۱

* بین $10^{-16}$ تا $10^{-12}$ ثانیه.

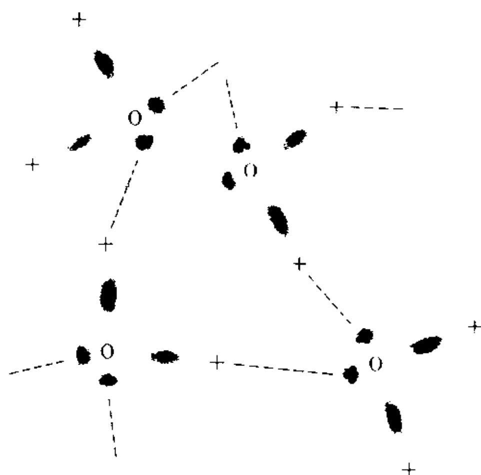
این گازها متراکم می‌شونـد، لیکن تا قبل از رسیدن به دماهای پایین این عمل صورت نمی‌گیرد.

**مولکولهای قطبی.** در مولکولهای غیرمتقارن نظیر $NH_3$، $CH_3Cl$ و $H_2O$ همیشه مراکز بارهای مثبت و منفی بریکدیگر منطبق نیستند. شکل ۲ــ۳ــ۴ این قطبیت را برای آمونیاك ($NH_3$) به بهترین وجــه نشان می‌دهــد. سه هستهٔ هیدروژن کــه در واقع فقط پروتون (+) تنها هستند در بالا طرف راست واقع‌اند، زوج الکترون تنها، انتهای دیگر مولکول‌را منفی کرده است. از آنجاکه جرم $CH_4$ و $NH_3$ تقریباً برابر است (به‌ترتیب ۱۶ و ۱۷amu)، پیوند بین مولکولی آنها را می‌تـوان با توجه به‌نقاط ذوب و جوش آنها مقایسه کرد. جدول ۲ــ۴ــ۱ نشان‌می‌دهد که آمونیاك باید به‌دمای ۲۴۰ K (‎−۳۳°C) برسد تا ارتعاشات گرمایی پیوندهای بین مولکولی را کاملا بشکند و تشکیل گاز دهد. در حالی که متان با مولکول‌متقارن و پیوند ضعیفتر در ۱۴۵ K (‎−۱۲۸ °C) بخار می‌شود. درمقابل $CH_3Cl$ تا دمای ۲۵۹ K (‎−۱۴ °C) تبخیر نمی‌شود [شکل ۲ــ۳ــ۳(ب)]، زیرا کلر دارای تعداد زیادی الکترون است که با مرکز مولکول فاصلهٔ نسبتاً زیادی دارند و جاذبه‌ای قوی بین مولکولهای دو قطبی مجاور به‌وجود می‌آورند.

**پل هیدروژنی.** سومین نــوع نیروی پیونــدی واندروالس در حقیقت حالت خاصی از مولکول قطبی است. با وجود این، پل هیدروژنی تقریباً قویترین پیوند فرعی است و غالباً دیده می‌شود. بنابراین توجه خاصی به‌آن شده و عنوان خاصی یافته است.

پروتون موجود در انتهای پیونــد C—H، O—H یــا N—H را الکترونها به‌طورکامل احاطه نکرده‌اند، در نتیجه این بار مثبت می‌تواند به‌وسیلهٔ الکترونهای ظرفیتی مولکولهای مجاورجذب شود. پیوند حاصل که از نوع کولنی است پل هیدروژنی نام دارد. مثال متداول آن آب است که در هرمولکول آن پروتون هیدروژن را زوج الکترونهای تنهای اکسیژن در مولکول مجاور جــذب می‌کند (شکل ۲ــ۴ــ۱). بیشینهٔ انــرژی این پیوند حدود ۳۰ kJ/mole (۷ kcal/mole) است و این در حالی است کــه (۱) بیشینهٔ انرژی برای‌سایر پیوندهای واندروالس ۵ kJ/mole (ومعمولا ≫۱ kJ/mole) است؛ و (۲) در پیوندهــای اصلی چندصدکیلو ژول بــرای ۱۰^۲۴ × ۶٫۰ پیوند است (بخش ۲ــ۲).

شیمیدانها اظهار می‌دارند کــه تأکید بیش‌از حد به‌اهمیت پل هیدروژنی ضروری است. مثلا مولکول آب که وزن مولکولی آن تنها ۱۸ amu است دربین موادی که‌وزن مولکولی‌کمتر از ۱۰۰ amu دارند بالاترین نقطهٔ جوش را دارد. اگر نقطهٔ جوش آب نظیرسایرمولکولهای سه‌چهار اتمی بود اقیانوسها وجود نداشتند و شرایط زمین و زیست به‌کلی دگرگون می‌شد. هنگام بررسی مواد خواهیم دیــد کــه پل هیدروژنی برخواص پلاستیکها (فصل ۷) و بعضی سرامیکها (فصل ۸) نیز اثر دارد.



**شکل ۲-۴-۱** پل هیدروژنی (در آب). هیدروژنی که در انتهای اربیتال قرار گرفته پروتون (+) فعال است و به وسیلهٔ زوج الکترونهای تنهای مولکولهای دیگر آب جذب می‌شود. (به‌شکل ۲ـ۳ـ۴ (ب) رجوع کنید) پل هیدروژنی سبب می‌شود تا آب در بین موادی که وزن مولکولی پایینی (۱۸ amu) دارند بالاترین نقطهٔ جوش را داشته باشد.

**مثال ۲-۴-۱** هربازوی OH مولکول آب دارای یك دو قطبی الکتریکی با گشتاوری برابر $۵ \times ۱۰^{-۳۰}$ coul . m است. گشتاور دوقطبی هرمولکول چقدر است؟

حل: دوقطبیهای مولکول آب زاویهٔ ۱۰۴٫۵ درجه می‌سازند (شکل ۲ـ۳ـ۴).

$$p = ۲(۵ \times ۱۰^{-۳۰}\,\mathrm{coul \cdot m})\cos(۱۰۴٫۵^\circ/۲)$$

$$= ۶ \times ۱۰^{-۳۰}\,\mathrm{C \cdot m}$$

توضیح. گشتاور دوقطبی عبارت است از حاصل‌ضرب بار الکتریکی در فاصلهٔ بین مراکز بارهای مثبت و منفی. ▲

**مثال ۲-۴-۲** مولکول $H_۲O$ در هراتم هیدروژن یك پروتون و در هراتم اکسیژن هشت پروتون دارد. الف) مراکز بارهای مثبت و منفی چقدر از یکدیگر فاصله دارند؟

مولکول $H_۲O$ را می‌توان به‌سبب دو پروتون $(H^+)$ دارای یك انتهای مثبت و به‌علت ۸ پروتون و مجموعهٔ ده الکترون $(O^{۲-})$ دارای یك انتهای منفی در نظر گرفت؛ ب) دو انتهای دوقطبی توصیف شده چقدر ازیکدیگر فاصله دارند؟

حل: از مثال ۲ـ۴ـ۱، گشتاور دوقطبی $(p = Qd)$ مولکول آب

$$6 \times 10^{-30}\ \text{coul} \cdot \text{m}$$

است.

الف)
$$Qd = 10(0.16 \times 10^{-18}\ \text{C})d = 6 \times 10^{-30}\ \text{C} \cdot \text{m}$$
$$d = (6 \times 10^{-30}\ \text{C} \cdot \text{m})/(1.6 \times 10^{-18}\ \text{C})$$
$$= 3.8 \times 10^{-12}\ \text{m} \quad (= 0.004\ \text{nm})$$

ب)
$$Qd = 2(0.16 \times 10^{-18}\ \text{C})d = 6 \times 10^{-30}\ \text{C} \cdot \text{m}$$
$$d = 19 \times 10^{-12}\ \text{m} \quad (= 0.02\ \text{nm})$$

توضیح. هر دو حالت حاکی از آن است که مراکز بارهای مثبت و منفی برهم منطبق نیستند. حالت اول ذرات بنیادی باردار (الکترون و پروتون) را در نظر می گیرد، حالت بعدی بارها را به‌اتمهای یونیده واگذار می کند. ▲

## ۲-۵ فواصل بین اتمی

با آنکه درمولکولهای دو اتمی پیوند و کوئوردیناسیون تنها مربوط به دو اتم است، بیشتر مواد شامل کوئوردیناسیون اتمهای بسیارند که ساختارمجتمعی تشکیل می‌دهند. دراین‌مورد دوعامل فاصلهٔ بین اتمی و آرایش‌فضایی اتمها اهمیت دارد. دراینجا این عوامل به‌تفصیل بررسی می‌شوند.

نیروی جاذبهٔ بین اتمها، که در بخش قبل از آن صحبت کردیم، اتمها را به‌طرف یکدیگر می کشد، اما چه عاملی از نزدیکی بیشتر اتمها به‌یکدیگر جلوگیری می کند؟ از شکلها و مباحث گذشته آشکار است که اطراف دستهٔ هر اتم با «فضای» خالی احاطه شده است. حرکت نوترونها در میان سوخت و مواد دیگر رئاکتور اتمی، وجود این فضای خالی را اثبات می کند. نوترونها قبل از توقف می‌توانند از میان اتمهای زیادی بگذرند (شکل ۶-۹-۱ را ببینید).

فضای بین اتمها از آنجا به‌وجود می آید که علاوه بر نیروی جاذبه‌ای که در بخشهای ۲-۲ و ۲-۴ شرح داده شد، نیروهای دافعه نیز بین اتمها وجود دارد. اصولا علت دافعهٔ متقابل این است که نزدیك شدن دو اتم تعداد زیادی الکترون را در موقعیت برهم کنش قرار می‌دهد. فاصلهٔ تعادلی آن فاصله‌ای است که درآن نیروهای جاذبه و دافعه باهم برابرند. تشابهی بین فاصلهٔ بین اتمی و فاصلهٔ بین دو آهنربای حلقه‌ای شکل ۲-۵-۱ می‌توان یافت. (دراین مثال، آهنرباها چنان قرارگرفته‌اندکه یکدیگر را به‌جای جذب، دفع کنند.) البته نیروها دراین‌مورد مشابه با نیروهای بین اتمها نیست ولی اصول‌تعادلهای نیرو قابل مقایسه است. حلقهٔ آهنربای بالایی تحت نیرویی (گرانشی) به طرف آهنربای پایینی (که دراین حالت درکف ظرف تثبیت شده است) حرکت می کند. چون نیروی



**شکل ۲-۵-۱** موازنهٔ نیروها (آهنرباهای حلقه‌ای سرامیکی). نیروی گرانشی، حلقهٔ بالایی را به‌طرف پایین می‌کشد و دافعهٔ مغناطیسی به‌طرف بالا به‌آن نیرو وارد می‌کند. درحالت تعادل فاصلهٔ معینی بین دو حلقه باقی می‌ماند. (البته دراین مثال نیروها شبیه نیروهای بین اتمها نیست، ولی اصول آن قابل مقایسه است.)

گرانشی درفواصلی که در اینجا مطرح است ثابت می‌ماند، آهنربای بالایی پایین می‌آید و به‌نقطه‌ای می‌رسد کـه با نیروی مغناطیسی مساوی ولی در جهت مخالف دفع می‌شود و نقطهٔ تعادل حاصل می‌شود زیرا افزایش‌نیروی دافعه تابع معکوسی ازفاصله است. توضیح آنکه بین آهنرباها فضایی باقی خواهد مانـد (مادهٔ غیرمغناطیسی می‌توانـد در این فضا حرکت کند، درست مانند نوترون(نوترون بار ندارد) که می‌تواند میان اتمهای جسم جامد حرکت کند).

**نیروهای کولنی.** برای نشان دادن موازنهٔ بین نیروهای جاذبه و دافعهٔ مواد، پیوند یونی به‌کار می‌رود. نیروی کولنی $F_C$ که بین دو بار نقطه‌ای به‌وجود آمده است به‌مقدار بارها $Z_1q$ و $Z_2q$، و فاصلهٔ بین آنها، $a_{1-2}$، بستگی دارد

$$F_C=\frac{-k_0(Z_1q)(Z_2q)}{a_{1-2}^2} \qquad (۲-۵-۱)$$

$Z$ ظرفیت (+ یا −) و $q$ برابر با $0.16\times10^{-18}$ کولن است. وقتی یونهای نزدیک بههم را بررسی می‌کنیم، ثابت تناسب $k_0$ به‌واحدهای مورد استفاده بستگی دارد.*

* در دستگاه SI، $k_0$ برابر $9\times10^9\ \mathrm{V\cdot m/C}$ است، زیرا $k_0=1/4\pi\epsilon_0$.

**نیروهای دافعهٔ الکترونی.** نیروی دافعهٔ بین میدانهای الکترونی دو اتم یا یون نیز تابع معکوسی از زمان است، ولی با نمای بیشتر

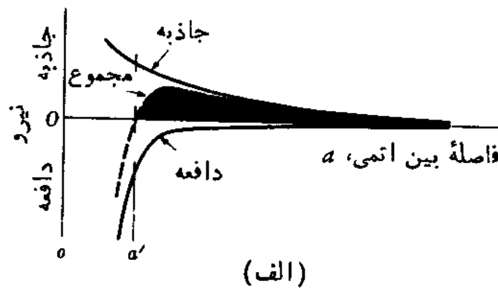
$$F_R=\frac{-bn}{a^{n+1}} \qquad (۲-۵-۲)$$ □

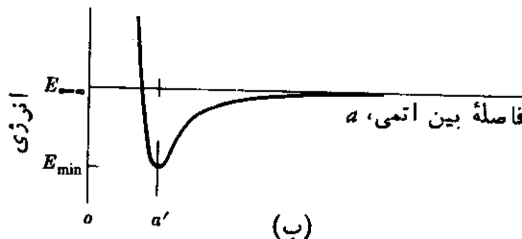
$b$ و $n$ ثابتهای تجربی‌اند و $n$ برای مواد جامد یونی حدود ۹ است. با مقایسهٔ $F_C \propto a^{-2}$ و $F_R \propto a^{-10}$ ، نتیجه می‌شود که درفواصل اتمی زیاد نیروهای جاذبه و درفواصل اتمی کم نیروهای دافعه غالب خواهند بود [شکل ۲−۵−۲ (الف)]. فاصلهٔ تعادلی، $o-a'$، درصورتی حاصل می‌شود که

$$F_C+F_R=0 \qquad (۳-۵-۲)$$

برای جدا کردن اتمها از یکدیگر نیروی کششی لازم است تا بتوانـد برجاذبهٔ بین اتمها غلبه کند، و برعکس برای نزدیک‌کردن اتمها به‌یکدیگر بایـد نیروی فشاری به‌آنها وارد کرد تا دافعهٔ الکترونی را که هرلحظه افزایش می‌یابد، خنثی کند.

هرجفت اتم یا یون معین، فاصلهٔ تعادلی ویژه‌ای دارد. اگر دما و سایر عوامل کنترل




**شکل ۲−۵−۲** فواصل بین اتمی. الف) فاصلهٔ تعادلی $o-a'$ فاصله‌ای است‌کـه درآن نیروهای جاذبه و دافعه مساوی‌اند؛ ب) کمترین انرژی پتانسیل نیزدرفاصلهٔ اتمی $o-a'$ ظاهر می‌شود. ازآنجا که $E=\int F\,da$، ناحیهٔ سایه‌زده در (الف) برابر عمق چاه انرژی در (ب) است.

شوند به‌کمك اشعهٔ ایکس می‌توان آن‌را تا پنج‌رقم با معنی تعیین کرد (فصل ۳). برای کم یا زیادکردن این فاصله به‌اندازهٔ یك‌درصد، نیروی زیادی لازم‌است (با توجه به‌مدول یانگ این تنش برای آهن برابر 2000 MPa است)، و به‌این دلیل دربسیاری موارد اگر استحکام یا آرایش اتمها مطرح باشد، ازگلوله‌های سخت به‌عنوان الگوی اتمی استفاده می‌شود.*

**انرژی پیوند.** مجموع دو نیروی فوق اساس محاسبهٔ انرژی پیوند را فراهم می‌کند [شکل ۲-۵-۲ (ب)]. چون انرژی عبارت است ازحاصلضرب نیرو درفاصله، داریم

$$E=\int_{\infty}^{a}(F_C+F_R)\,da \qquad (۲-۵-۴)$$

فاصلهٔ اتمی بینهایت‌را به عنوان مبدأ انتخاب می‌کنیم، $E_{a=\infty}=0$. با نزدیك شدن اتمها به‌یکدیگر انرژیی برابر با مساحت سطح سایه زدهٔ شکل ۲-۵-۲ (الف) آزاد می‌شود. مقدار این انرژی آزاد شده در شکل ۲-۵-۲ (ب) دیده می‌شود. توجه داشته باشید که کمینهٔ انرژی در فاصلهٔ $o-a'$ است که درآن $F=0=dE/da$، زیرا برای نزدیکتر کردن اتمها به‌یکدیگر انرژی لازم است. عمق این چاه انرژی، یعنی، $E_{a=\infty}-E_{min}$، انرژی پیوند را نشان می‌دهد، زیرا وقتی دو اتم درکنار یکدیگر (در صفر مطلق) قرار گیرند این مقدار انرژی آزاد می‌شود (—). جدول ۲-۳-۱ چنین مقادیری را برای پیوندهای کووالانسی ارائه می‌کند.**

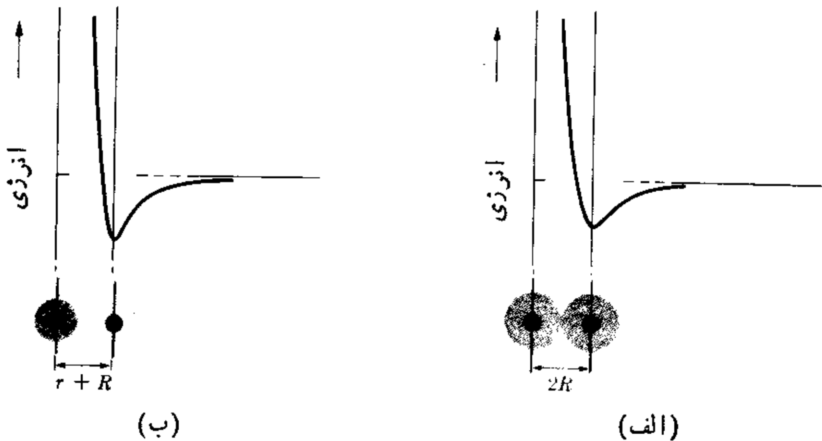
طرحواره‌هایی‌که در شکل ۲-۵-۲ دیده می‌شوند درمباحث متنوعی در بخشهای آینده مورد استفاده قرار می‌گیرند، به‌ویژه در بررسی ضریب الاستیك، انبساط گرمایی، استحکامات نظری، دماهای ذوب وتبخیر و... .

**شعاع اتمی و شعاع یونی.** فاصلهٔ تعادلی بین‌مراکز دواتم همسایه جمع دوشعاع آنهاست (شکل ۲-۵-۳). مثلا برای آهن در دمای اتاق، فاصلهٔ مراکز دو اتم از یکدیگر 0٫2482 nm (یا 2٫482 Å) است و چون دو اتم یکسانند، شعاع اتم آهن 0٫1241 nm خواهد بود.

---

* الگوی‌گلوله‌های سخت برای‌تمام توضیحات مربوط به‌رفتار اتمی مناسب نیست. مثلا نوترون (که بار ندارد) می‌تواند درفضای بین اتمها حرکت‌کند بدون اینکه تحت‌تأثیر نیروهای دافعهٔ الکترونی قرارگیرد. به‌همین ترتیب، هستهٔ اتمی می‌تواند با افزایش انرژی‌گرمایی، شدیدتر ارتعاش‌کند و فقط درفواصل متوسط بین اتمی اندکی انبساط داشته باشد. بالاخره با تغییرات لحظه‌ای درمیدانهای الکتریکی، اتمها می‌توانند درون جسم جامد ازکنار یکدیگر عبورکنند (به‌نفوذ، درفصل ۴ مراجعه‌کنید).

** نیروهای جاذبه در پیوندهای کووالانسی از نیروهای جاذبهٔ‌کولنی ارائه شده در معادلهٔ (۲-۵-۱) پیچیده‌ترند. اما درعین‌حال چاه انرژی قابل مقایسه‌ای وجود دارد.




**شکل ۲ـ۵ـ۳** طول پیوند. فاصلهٔ دو اتم مجاور در نقطه‌ای که انرژی کمینه است، طول پیوند را نشان می‌دهد و برابر با جمع دو شعاع است. الف) در فلزات خالص شعاع همهٔ اتمها یکسان است؛ ب) در جامدات یونی شعاعهـا مختلف است زیـرا دو یون مجاور هیچگاه یکسان نیستند.

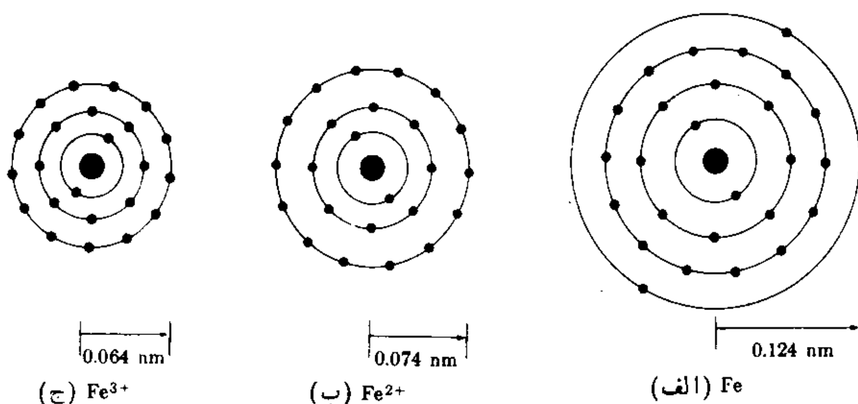
چندین عامل می‌تواند فاصلهٔ بین مراکز اتمها را تغییر دهد. اولی دماست. هرگونه افزایشی درانرژی، اگر بالاتر ازنقطهٔ کمینه‌ای باشدکه درشکل ۲ـ۵ـ۲ (ب) دیده می‌شود، فاصلهٔ متوسط را افزایش می‌دهـد و این به‌دلیل شکل نامتقارن درهٔ انرژی است. افزایش فاصلهٔ متوسط بین اتمها، انبساط گرمایی مواد را توجیه می‌کند.

ظرفیت یونی نیز برفاصلهٔ بین اتمی اثر دارد. شعاع یون آهن دوظرفیتی ($Fe^{2+}$)، ۰٫۰۷۴nm است که ازشعاع اتم آهن فلزی کمتر است [جدول ۲ـ۵ـ۱ و پیوست (ب)*]؛ چون الکترون دو ظرفیتی خارجی یون آهن (شکل ۲ـ۵ـ۴)، خارج شده‌اند ۲۴ الکترون باقیمانده به‌طرف هسته، کـه هنوز ۲۶ بار مثبت دارد، کشیده می‌شوند. فاصلهٔ بین اتمی هنگامی کمتر می‌شود که الکترون دیگری ازمدارخارج و یون فریک ($Fe^{3+}$) تولید شود. شعاع یون دراین حالت ۰٫۰۶۴nm است که تنها نصف شعاع آهن فلزی است.

یون منفی، بزرگتر از اتم مربوط به‌آن است، زیرا تعداد الکترونهای احاطه کنندهٔ هسته ازتعداد پروتونهای درون هسته بیشتر است و الکترونهای اضافه به‌اندازهٔ الکترونهای اولیه به‌هسته جذب نمی‌شوند.

سومین عامل مؤثر براندازهٔ اتم یا یون، تعداد اتمهای مجاور است. وقتی اتم آهن با هشت اتم دیگر آهن در تماس باشد، که آرایش عادی آهن در دمای اتاق است، شعاع

* شعاعهای فلزی به‌کار رفته دراین کتاب ازکتاب راهنمای فلزات ASM استخراج شده‌اند. شعاعهای یونی براساس الگوی آرنس (Ahrens) است.




**شکل ۲-۵-۴** اندازهٔ اتمی و یونی (طرحوار). الف) تعداد پروتونها در اتم و یون آهن یکسان است (۲۶)؛ ب) با خارج شدن دو الکترون، ۲۴ الکترون باقیمانده و یونهای منفی مجاور به‌طرف ۲۶ پروتون هسته کشیده شده به‌آن نزدیك می‌شوند؛ ج) ۲۳ الکترون یون فریك بازهم به‌هسته نزدیکترند.

آن nm ۱۲۴۱ر۰ است. اگر اتمها چنان قرار گیرند که هراتم آهن با دوازده اتم دیگر در تماس باشد شعاع هر اتم اندکی افزایش می‌یابد و (تقریباً) به nm ۱۲۷ر۰ می‌رسد. بنابراین هرچه اتمهای مجاور زیادتر باشند دافعهٔ الکترونی اتمهای همسایه بیشتر است و درنتیجه فواصل بین اتمی نیز افزایش می‌یابند (جدول ۲-۵-۱).

معمولا درموادی‌که پیوندکووالانسی دارند از شعاع اتمی صحبت نمی‌کنیم زیرا توزیع الکترونها ممکن است به‌صورت کروی نباشد [شکل ۲-۳-۳ (الف)]. به‌علاوه در پیوندهای فضا ویژه (بخش ۲-۲) عاملی که کوئوردیناسیون اتمها را محدود می‌کند، اندازهٔ اتم نیست بلکه تعداد جفت الکترونهای موجود است. دراین‌صورت با کمك‌جدول ۲-۵-۱ می‌توان فواصل بین اتمی را با یکدیگر مقایسه کرد. در اتان با پیوند سادهٔ C—C، فاصلهٔ بین اتمی برابر nm ۱۵۴ر۰ بوده، درپیوند C=C برابر ۱۳nmر۰ و درپیوند C≡C برابر ۱۲nmر۰ است. البته چنین تغییراتی قابل پیش‌بینی‌است‌زیرا درپیوندهای چندگانه انرژی پیوند زیادتر است (جدول ۲-۳-۱).

□ **مثال ۲-۵-۱** MgO و NaCl نظیر یکدیگرند، جزاینکه یونهای $Mg^{2+}$ و $O^{2-}$ دو ظرفیتی و $Na^{+}$ و $Cl^{-}$ یك ظرفیتی‌اند. در نتیجه فاصلهٔ بین اتمی Mg—O برابر ۲۱nmر۰ ولی فاصلهٔ بین اتمی Na—Cl برابر ۲۸nmر۰ است. نیروهای جاذبهٔ کولنی (→←) این دو جفت یون را دراین دو فاصله، باهم مقایسه کنید.

حل: با استفاده ازمعادلهٔ (۲-۵-۱) و پانوشت مربوط به‌آن

$$F_{Mg\rightarrow\leftarrow O} = -(۹\times ۱۰^{۹}\ V\cdot m/C)\left(\frac{(+۲)(-۲)(۰٫۱۶\times ۱۰^{-۱۸}C)^{۲}}{(۰٫۲۱\times ۱۰^{-۹}m)^{۲}}\right)$$

$$= ۲۰٫۹\times ۱۰^{-۹}\ J/m$$

**جدول ۲-۵-۱** شعاع اتمی برخی ازعناصر

| عنصر | اتمهای فلزی | | یونها | | | پیوند کووالانسی | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CN | شعاع nm | ظرفیت | CN* | شعاع nm** | نصف فاصلهٔ پیوند، nm | |
| کربن | | | | | | ۰٫۰۷۷ | تنها |
| | | | | | | ۰٫۰۶۵ | دوتایی |
| | | | | | | ۰٫۰۶ | سه‌تایی |
| سیلیسیم | | | +۴ | ۶ | ۰٫۰۴۲ | ۰٫۱۱۷ | تنها |
| | | | +۴ | ۴ | ۰٫۰۳۸ | | |
| اکسیژن | | | −۲ | ۸ | ۰٫۱۴۴ | ۰٫۰۷۵ | تنها |
| | | | −۲ | ۶ | ۰٫۱۴۰ | ۰٫۰۶۵ | دوتایی |
| | | | −۲ | ۴ | ۰٫۱۲۷ | | |
| | | | −۲ | ۲ | ~۰٫۱۱۴ | | |
| کلر | | | −۱ | ۸ | ۰٫۱۸۷ | | |
| | | | −۱ | ۶ | ۰٫۱۸۱ | ۰٫۰۹۹ | تنها |
| سدیم | ۸ | ۰٫۱۸۵۷ | +۱ | ۶ | ۰٫۰۹۷ | | |
| منیزیم | ۱۲ | ۰٫۱۶۱ | +۲ | ۶ | ۰٫۰۶۶ | | |
| آلومینیم | ۱۲ | ۰٫۱۴۳۱ | +۳ | ۶ | ۰٫۰۵۱ | | |
| | | | +۳ | ۴ | ۰٫۰۴۶ | | |
| آهن | ۸ | ۰٫۱۲۴۱ | +۲ | ۶ | ۰٫۰۷۴ | | |
| | ۱۲ | ~۰٫۱۲۷ | +۳ | ۶ | ۰٫۰۶۴ | | |
| مس | ۱۲ | ۰٫۱۲۷۸ | +۱ | ۶ | ۰٫۰۹۶ | | |

* CN = عددکوئوردیناسیون، یعنی تعداد همسایه‌های مجاور، برای یونها

$$۱٫۱\, R_{CN=۴} \approx R_{CN=۶} \approx ۰٫۹۷\, R_{CN=۸}$$

** این مقادیر درسیستمهای مختلف اندکی متفاوت است. براساس الگوی آرنس.

به‌همین ترتیب

$$F_{Na\rightarrow\leftarrow Cl}=۲٫۹\times ۱۰^{-۹}\ J/m$$

توضیح. در این فاصله‌های تعادلی، نیروهای دافعه (رابطهٔ ۲-۵-۲) به ترتیب $nJ/m$ ۲۰٫۹− و $nJ/m$ ۲٫۹− خواهد بود. در این صورت با فرض $n=۹$ از رابطهٔ (۲-۵-۲) مقدار ثابت تجربی $b$ برای MgO و NaCl به ترتیب $Jm^9$ $۰٫۴\times ۱۰^{-۱۰۵}$ ∼ و $Jm^9$ $۱۰^{-۱۰۵}$ ∼ خواهد بود. ▲

□ **مثال ۲-۵-۲** انرژی‌پیوند $Mg^{2+}\rightarrow\leftarrow O^{2-}$ را با انرژی‌پیوند $Na^{+}\rightarrow\leftarrow Cl^{-}$ مقایسه کنید. با ترکیب‌روابط (۲-۵-۱) و (۲-۵-۲) و به‌دست آوردن رابطه (۲-۵-۴) و انتگرال‌گیری از $\infty$ تا $a$ داریم

$$E=\frac{k_0 Z_1 Z_2 q^2}{a}+\frac{b}{a^n} \qquad (۲-۵-۵)$$

حل: با استفاده از داده‌های مثال ۲-۵-۱

$$E_{Mg-O}=\frac{(۹\times ۱۰^{۹}\ V\cdot m/C)(-۴)(۰٫۱۶\times ۱۰^{-۱۸}\ C)^2}{۰٫۲۱\times ۱۰^{-۹}\ m}$$

$$+\frac{۰٫۴\times ۱۰^{-۱۰۵}\ Jm^9}{(۰٫۲۱\times ۱۰^{-۹}m)^9}$$

$$=-۴٫۴\times ۱۰^{-۱۸}\ J+۰٫۵\times ۱۰^{-۱۸}\ J$$

$$=-۳٫۹\times ۱۰^{-۱۸}\ J$$

$$E_{Na-Cl}=-۰٫۸\times ۱۰^{-۱۸}\ J+۰٫۱\times ۱۰^{-۱۸}\ J$$

$$=-۰٫۷\times ۱۰^{-۱۸}\ J$$

توضیح. چون مبدأ انرژی در فاصلهٔ بینهایت است به‌جای از $a$ تا $\infty$، حدود انتگرال از $\infty$ تا $a$ است. منفی بودن این مقادیر نشان می‌دهد که هنگام نزدیک شدن دو یون به‌یکدیگر انرژی آزاد می‌شود. دراین گسترهٔ انرژی معمولاً الکترون ولت (eV) به‌کار می‌رود (هر ژول برابر با $۶٫۲۴\times ۱۰^{۱۸}\ eV$ است)؛ بنابراین دو انرژی محاسبه شده به‌ترتیب $eV$ ۲۴− و $eV$ ۴٫۴− می‌شود. ▲

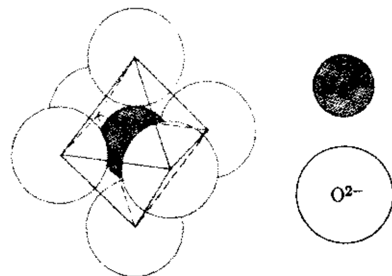
## ۲-۶ عدد کوئوردیناسیون

بیشتر بحثهای قبلی پیرامون ترکیبات دو اتمی، که فقط شامل دو اتم‌اند، دور می‌زد، اما

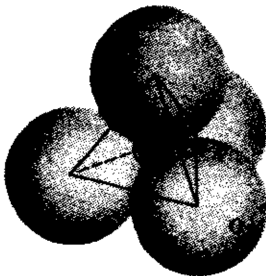
چون در بیشتر مواد مهندسی اتمها به‌صورت گروههای چندتایی همسایه شده‌اند باید به گروه چند اتمیها توجه کرد. به‌این دلیل هنگام بررسی پیوند اتمها در مواد، صحبت از عدد کوئوردیناسیون به‌میان می‌آید. عدد کوئوردیناسیون، CN، تعداد همسایه‌های درجهٔ اول اتم است بنابراین در شکل ۲ــ۳ــ۳ عدد کوئوردیناسیون کربن چهار است، در مقابل هیدروژنها تنها یك همسایه بی‌واسطه دارند بنابراین عدد کوئوردیناسیون آنها یك است. درشکل ۲ــ۶ــ۱ عدد کوئوردیناسیون یون منیزیم، $Mg^{2+}$، شش است.

دو عامل عدد کوئوردیناسیون اتـم را کنترل می‌کند. اولی کووالانسی بودن است؛ به‌ویژه اینکه تعداد پیوندهای کووالانسی اطراف هر اتم، به‌تعداد الکترونهای ظرفیتی آن بستگی دارد. به‌این ترتیب هالوژنها، کـه درگروه VII جدول تناوبی قرار دارند (شکل ۲ــ۱ــ۱)، تنها یك پیوندکووالانسی تشکیل می‌دهندکه دراین‌صورت عددکوئوردیناسیون آنها یك خواهد بـود. اکسیژن و اعضای خانوادهٔ آنکـه درگروه VI جدول واقع‌اند می‌توانند مولکول دو پیوندی تشکیل دهند و معمولا بیشینهٔ عـددکوئوردیناسیون آنها دو است (البته اکسیژن با یك‌پیوند دوتایی می‌تواند فقط با یك‌اتم دیگر کوئوردینانس شود). عناصر گروه نیتروژن چـون در گروه V قرار دارند بیشینهٔ عدد کوئوردیناسیون آنها سه است. و سرانجام کربن وسیلیسیم درگروه IV با دیگر اتمها چهار پیوند به‌وجود می‌آورند و بیشینهٔ عددکوئوردیناسیون آنها چهار است [شکل ۲ــ۲ــ۴ (ب)].

عامل دومی کـه برعدد کوئوردیناسیون اثر می‌گذارد فشردگی اتمی مؤثر است. از آنجا که هنگام نزدیك شدن یونهای ناهمنام انرژی آزاد می‌شود، ترکیبات یونی معمولا عددکوئوردیناسیون بالایی دارند، یعنی تعداد زیادی اتم می‌توانند همسایه باشند بی‌آنکه به‌دلیل‌مجاورت بارهای‌همنام نیروهای دافعهٔ متقابل‌قوی ایجاد شده باشد. درشکل ۲ــ۲ــ۲ این مطلب را برای NaCl نشان دادیم، شکل ۲ــ۶ــ۱ (الف) نیز یـونهای $Mg^{2+}$ را




(الف)



(ب)

**شکل ۲ــ۶ــ۱** عدد کوئوردیناسیون پیوندهای یونی. الف) حداکثر شش یون اکسیژن ($O^{2-}$) می‌توانند هر یون منیزیم ($Mg^{2+}$) را احاطه کنند؛ ب) عدد کوئوردیناسیون یون سیلیسیم، $Si^{4+}$، بین یونهای اکسیژن ($O^{2-}$) تنها چهار است زیرا نسبت شعاعها کمتر از ۰٫۴۱ است (جدول ۲ــ۶ــ۱).

**جدول ۲ـ۶ـ۱ عدد کوئوردیناسیون برحسب کمینهٔ نسبت شعاعها**

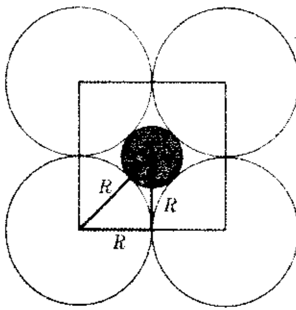
| عدد کوئوردیناسیون | نسبت شعاعها $r/R$* | هندسهٔ کوئوردیناسیون |
|---|---|---|
| ۳ـتا | $\geqslant$ ۰٫۱۵۵ | |
| ۴ | $\geqslant$ ۰٫۲۲۵ | |
| ۶ | $\geqslant$ ۰٫۴۱۴ | |
| ۸ | $\geqslant$ ۰٫۷۳۲ | |
| ۱۲ | ۱٫۰ | – |

* $r$ــ شعاع کوچکتر؛ $R$ــشعاع بزرگتر.

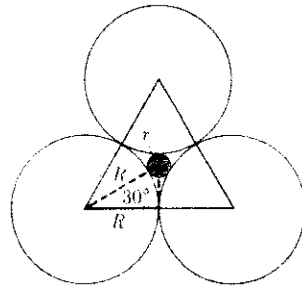
که با یونهای $O^{2-}$ احاطه شده‌اند نشان می‌دهد. $r$، شعاع یون منیزیم که برابر ۰٫۰۶۶nm است (جدول ۲ـ۵ـ۱ و پیوست ب) آنقدر بزرگ است که شش یون اکسیژن ($R=$ ۰٫۱۴۰ nm) آن را احاطه می‌کنند بی‌آنکه یونهای منفی «تماس» مستقیمی باهم داشته باشند. نسبت شعاعها ($r/R$) برای داشتن شش همسایهٔ بدون برخورد ۰٫۴۱ است (جدول ۲ـ۶ـ۱). عدد کوئوردیناسیون شش (CN = ۶) در ترکیبات یونی بسیار متداول است.

درفصل ۸ خواهیم دید که عدد کوئوردیناسیون سیلیسیم در $SiO_2$ چهار است (CN = ۴). زیرا یون $Si^{4+}$ کوچکتر از آن است که بتواند شش یون اکسیژن در همسایگی خود داشته باشد. نسبت $r/R$ برای Si/O حدود ۰٫۳ است که با پیش‌بینی جدول ۲ـ۶ـ۱ مطابقت دارد و در شکل ۲ـ۶ـ۱ (ب) نیز دیده می‌شود. عامل دیگری نیز عدد کوئوردیناسیون ۴ را برای سیلیسیم تأیید می‌کند و آن به‌اشتراک گذاشتن قابل توجه الکترون بین سیلیسیم و اکسیژن است (یادآوری می‌شود در آخرین پاراگراف کوتاه بخش ۲ـ۲ گفته شد که پیوندهای مخلوط نیز بسیار دیده می‌شوند). همچون کربن، درشرایط عادی بیشینهٔ تعداد پیوند کووالانسی درسیلیسیم چهار است و این ترتیب، احتمال CN = ۴ زیادتر می‌شود.

**مثال ۲ـ۶ـ۱** نشان دهید عدد ۰٫۱۵ نسبت کمینه برای عدد کوئوردیناسیون سه، است (جدول ۲ـ۶ـ۱).




(ب)




(الف)

**شکل ۲ـ۶ـ۲** محاسبات عددکوئوردیناسیون. الف) عدد کوئوردیناسیون سه؛ ب) عدد کوئوردیناسیون شش. [این شکل را با مثالها وشکل ۲ـ۶ـ۱ (الف) مقایسه کنید.]

حل: نسبت شعاعها برای آنکه عددکوئوردیناسیون سه میسر باشد درشکل ۲ـ۶ـ۲ (الف) دیده می‌شود. دراین صورت

$$\cos ۳۰^{\circ} = \frac{R}{R+r} = ۰٫۸۶۶$$

$$\frac{r}{R} = \frac{۱ - ۰٫۸۸۶}{۰٫۸۶۶} = ۰٫۱۵$$ ▲

**مثال ۲ـ۶ـ۲** نشان دهید کمینهٔ نسبت شعاعها برای عدد کوئوردیناسیون شش، برابر با ۰٫۴۱ است.

حل: کمینهٔ نسبت شعاعها برای آنکه عددکوئوردیناسیون شش میسر باشد در شکل ۲ـ۶ـ۲ (ب) دیده می‌شود دراین رابطه،

$$(r+R)^{۲} = R^{۲} + R^{۲}$$

$$r = \sqrt{۲}R - R$$

و

$$\frac{r}{R} = ۰٫۴۱$$

توضیح. درشکل ۲ـ۶ـ۱(الف) پنجمین و ششمین یون دربالا و پایین یون مرکزی شکل ۲ـ۶ـ۲ (ب) واقع‌اند. ▲

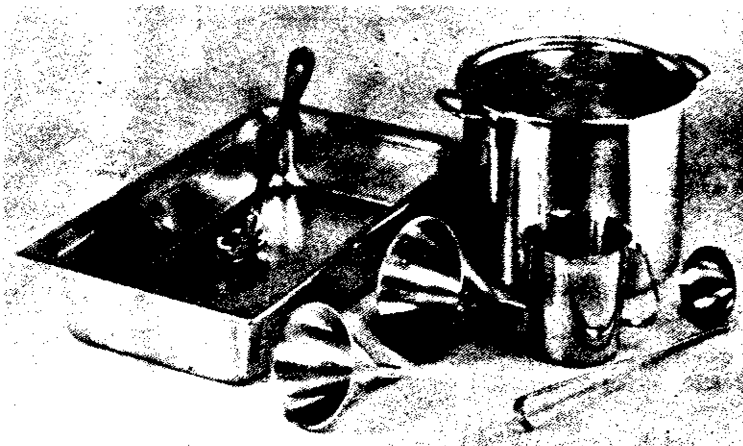
## ۲-۷ انواع مواد

مواد را درحالت کلی‌می‌توان به سه دستهٔ اصلی، فلزات، پلی‌مرها (یا پلاستیکها) و سرامیکها تقسیم کــرد. درحقیقت، این تقسیم‌بندی ایدئال است، زیــرا بیشتر مواد خواص بینابینی دارند.

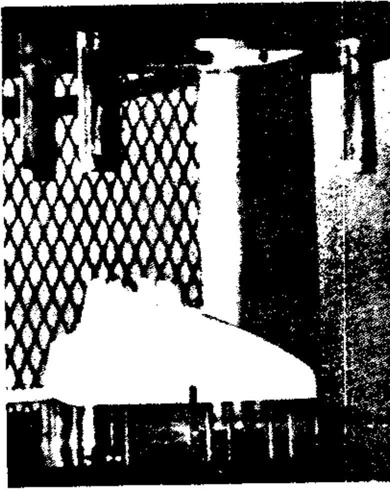
**فلزات.** از مشخصات اصلی این مــواد بالا بودن ضریب رسانندگی گرمایی و الکتریکی است. فلزات درمقابل نور کدرند، می‌توان آنها را صیقل داد و براق کرد(شکل۲-۷-۱). فلزات معمولا، ولی نه همیشه، نسبتاً سنگین و شکل پذیرند.

مشخصات فوق را چگونه می‌توان توجیه‌کرد؟ ساده‌ترین جواب آن است کــه فلز به‌علت وجود تعدادی الکترون آزاد، کــه می‌توانند اتمهای «مادر» خود را رهــا کنند، چنین خواصی دارد [شکل ۲-۲-۷ (ب)]. (برعکس در پلی‌مرها و سرامیکها الکترونها نمی‌توانند تا این‌حد آزاد باشند) حرکت این الکترونهای‌آزاد سبب انتقال بارالکتریکی و انتقال انرژی‌گرمایی در فلزات می‌شود. قابلیت انعکاس و کدر بودن فلزات نیز به‌دلیل عکس‌العمل الکترونهای آزاد درمقابل ارتعاشات الکترومغناطیسی در بسامدهای نــوری است، و این نتیجهٔ دیگری از آزادی نسبی الکترونها و جدا شدن آنها از اتم مادر است.

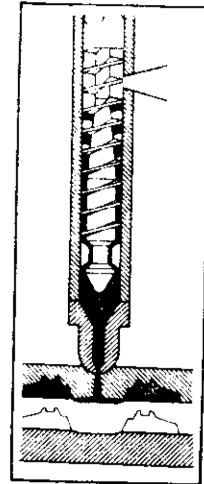
**پلی‌مرها (معمولا پلاستیك نامیده می‌شوند).** پلاستیکها به‌خاطر چگالی‌کم و کاربردشان به‌عنوان عایق‌گرمایی و الکتریکی به‌خوبی‌شناخته شده‌اند. نور را خیلی‌کم منعکس‌می‌کنند



**شکل ۲-۷-۱** مواد فلزی (لوازم‌آشپزخانه‌های‌صنعتی ازفولاد زنگ‌نزن). فلزات برای فرایندهای لازم انعطاف‌پذیرند. جلا و رسانندگی فلزات ناشی از مشخصات الکترونی پیوندهای بین اتمی است.



(ب)



(الف)

**شکل ۲-۷-۲** محصولات پلاستیکی (گیرندهٔ تلفن که در قالب تزریقی ساخته شده است). الف) پلاستیك گرم‌شده که نرم است با فشار از راهگاه به‌درون حفرهٔ قالب رانده می‌شود؛ ب) محصول به‌دست آمده که پس از سردشدن، صلب است تنها در یك مرحله تولید شده‌است.

و شفاف یا نیمه شفاف‌اند (حداقل وقتی ضخامت کمی داشته باشند) سرانجام بعضی از آنها خمش‌پذیرند و به‌راحتی تغییرشکل می‌دهند. هنگام تولید از این مشخصهٔ آخر استفاده می‌شود (شکل ۲-۷-۲).

برخلاف فلزات، که تعدادی الکترون مهاجر دارند، عناصر غیرفلزی در گوشهٔ راست و بالای جدول تناوبی (شکل ۲-۱-۱) برای گرفتن الکترون جاذبهٔ زیادی دارند و هر الکترون به‌یك یا یك‌جفت اتم ویژه می‌پیوندد. به‌این دلیل رسانندگی گرمایی و الکتریکی پلاستیکها بسیار محدود است زیرا تمام انرژی گرمایی باید از طریق ارتعاشات اتمی از نواحی گرم به‌سرد منتقل شود که فرایندی است به‌مراتب کندتر از انتقال الکترونی انرژی که در فلزات صورت می‌گیرد. به‌علاوه الکترونهای کم تحرك در پلاستیکها بهتر می‌توانند ارتعاشات خود را با ارتعاشات نور تطبیق دهند و بنابراین اشعهٔ نور را جذب نمی‌کنند.

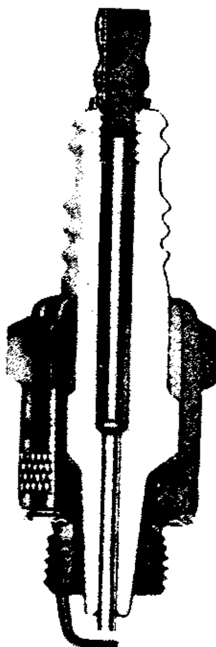
موادی که منحصراً از عناصر غیرفلزی تشکیل شده‌اند، الکترون به‌اشتراك می‌گذارند تا مولکولهای بزرگ به‌وجود آورند. این مولکولها اغلب ماکرومولکول نامیده می‌شوند. درفصل ۷ خواهیم دید که این مولکولهای بزرگ از واحدهای تکراری یا مرهای زیادی تشکیل شده‌اند که واژهٔ پلی‌مر از آن ناشی می‌شود.

**سرامیکها.** به‌عبارت ساده سرامیکها ترکیباتی‌اند که ازعناصرفلزی و غیرفلزی تشکیل شده‌اند. مثالهای فراوانی دراین مورد وجود دارد از جمله می‌توان سیمان سازنده بتن (حتی خود

سنگها)، شیشه، عایق چینی شمع (شکل ۲-۷-۳)، و اکسید سوختهای هسته‌ای مانند $UO_2$ را نام برد.

هر کدام از این مواد نسبتاً سخت و شکننده‌اند، در واقع سختی و تردی سرامیکها صفات عمومی آنهاست به‌علاوه بیش از فلزات یا پلیمرها در برابر گرما و محیطهای خورنده مقاوم‌اند. اساس این مشخصات نیز رفتار الکترونی اتمهای تشکیل‌دهنده است. عناصر فلزی طبق خصوصیات طبیعی خود الکترونهای آخرین مدار را رها می‌کنند و اتمهای غیرفلزی این الکترونها را می‌گیرند و نگه می‌دارند. در نتیجه این الکترونها بی‌حرکت می‌شوند، بنابراین مواد سرامیکی هم از نظر گرمایی وهم از نظر الکتریکی عایقهای خوبی‌هستند.

از طرف دیگر یونهای فلزی‌مثبت (اتمهایی‌که الکترون از دست داده‌اند) و یونهای غیرفلزی منفی (اتمهایی که‌الکترون گرفته‌اند) به‌شدت یکدیگر را جذب‌می‌کنند. هر کاتیون (مثبت) را آنیونها (منفی) احاطه می‌کنند و برای جداکردن آنها از یکدیگر انرژی زیاد (و بنابراین نیروی زیادی) لازم‌است. به‌این‌جهت سرامیکهاسخت (مقاوم از نظر مکانیکی)، دیرگداز (مقاوم از نظر گرمایی)، و بی‌اثر (مقاوم از نظر شیمیایی) خواهند بود.



**شکل ۲-۷-۳** عـایق سرامیکی (در شمع). جنس عایق عمدتاً $Al_2O_3$ است‌که ترکیبی از عناصر فلزی و غیرفلزی است.

# مرور و بررسی مطالب

## خواص کلی مواد

بعضی از خواص مواد را کـه درفصل اول آمد می‌توان از نظر کیفی به‌مشخصات پیوند اتمی، که دراین فصل شرح داده شد، ارتباط داد.

۱. چگالی را جرم اتمی، شعاع اتمی و عدد کوئوردیناسیون کنترل مـی‌کند. عدد کوئوردیناسیون عامل بسیار مهمی است زیرا ضریب فشردگی را کنترل می‌کند.

۲. دمای ذوب و جوش را می‌توان به‌عمق درهٔ انرژی در شکل ۲ــ۵ــ۲ (ب) ربط داد. در دمای‌صفر مطلق (در پایین دره) اتمهاکمینهٔ انرژی را دارند. با افزایش دما انرژی زیاد می‌شود تا جایی که اتمها می‌توانند از یکدیگر جدا شوند.

۳. استحکام نیز به ارتفاع منحنی کل نیرو یا منحنی مجموع شکل ۲ــ۵ــ۲ (الف) بستگی دارد. این‌نیرو در ارتباط باسطح مقطع، تنش لازم برای جداشدن اتمها را به‌دست می‌دهد. (همچنان که در بخش ۶ــ۴ خواهیم دیـد به‌غیراز جداشدن مستقیم اتمها، مـواد می‌توانندطی فرایند دیگری تغییر شکل‌دهند. ولی تنش لازم برای این تغییر شکل نیزتحت کنترل نیروهای بین‌اتمی‌است.) از آنجاکه عمیقتر بودن درهٔ انرژی نیز نمایانگر نیروهای جاذبهٔ بین اتمی بزرگتر است، موادی کـه نقطهٔ ذوب بالایی دارنـد سخت‌ترنـد. مثلا می‌توان الماس، $Al_2O_3$ و TiC را نام برد. به‌عکس موادی چون سرب، پلاستیکها، یخ و گریس که پیوندهای ضعیفی دارند نرم‌اند و نقطهٔ ذوب پایینی دارند. البته در موادی که بیش‌از یك‌نوع پیوند دارند، مانند گرافیت و خاك رس، گاهی استثناهایی دیده می‌شود.

۴. مدول کشسانی را می‌توان از شیب منحنی کلی نیرو در شکل ۲ــ۵ــ۲ (الف) محاسبه‌کرد. زیرا درفاصلهٔ‌تعادلی که‌مجموع نیروها صفراست، $dF/da$ تنش را به‌کرنش ربط‌می‌دهد، تاجایی که‌کرنش یاتغییر فاصلهٔ بین اتمی کمتراز یك‌درصد باشد مدول کشسانی عملاً ثابت خواهد بود. کشش یافشار بیش‌ازحد، مدول کشسانی‌را به‌ترتیب کم‌یازیادمی‌کند.

۵. انبساط گرمایی موادی که ضریب فشردگی تقریباً یکسانی دارند، با دمای ذوب آنها نسبت عکس دارد. این رابطهٔ غیر مستقیم از آنجا ناشی می‌شود که هرچه نقطهٔ ذوب بالاترباشد درهٔ انرژی آن عمیقتر و بنابراین متقارنتر خواهدبود، درنتیجه به‌ازای هرتغییر معین در انرژی گرمایی، میانگین فـاصلهٔ بین اتمی کمتر افزایش می‌یابد. مثالهایی از این قبیل فلزات بدین قرار است:

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| جیوه | دمای‌ذوب | $-39°C$ | ، | ضریب انبساط خطی | $40 \times 10^{-6} m/m.°C$ |
| سرب | دمای‌ذوب | $327°C$ | ، | ضریب انبساط خطی | $29 \times 10^{-6} m/m.°C$ |
| آلومینیم | دمای‌ذوب | $660°C$ | ، | ضریب انبساط خطی | $22 \times 10^{-6} m/m.°C$ |
| مس | دمای‌ذوب | $1084°C$ | ، | ضریب انبساط خطی | $17 \times 10^{-6} m/m.°C$ |
| آهن | دمای‌ذوب | $1538°C$ | ، | ضریب انبساط خطی | $12 \times 10^{-6} m/m.°C$ |
| تنگستن | دمای‌ذوب | $3387°C$ | ، | ضریب انبساط خطی | $4.2 \times 10^{-6} m/m.°C$ |

۶. ضریب رسانندگی الکتریکی به ماهیت پیوندهای اتمی بستگی زیادی دارد. موادی که پیوند یونی یا کووالانسی دارند رساناهای بسیار ضعیفی‌اند زیرا الکترونها نمی‌توانند اتمهای میزبان خود را ترک کنند. از طرف دیگر، الکترونهای آزاد فلزات هنگام اعمال پتانسیل به‌حرکت‌درمی‌آیند. درفصل ۵ دربارهٔ نیمرساناها بحث خواهد شد، ولی دراینجامی‌توان گفت آزادی حرکت الکترونهایشان میزان رسانندگی آنها را کنترل می‌کند.

۷. رسانندگی گرمایی در موادی‌که پیوند فلزی دارند زیاد است زیرا الکترونهای آزاد انرژی گرمایی را نیز به‌خوبی انرژی الکتریکی، انتقال می‌دهند.

۸. دراینجا اثر ساختار اتمها روی خواص شیمیایی به‌طور کامل بیان نشده است. زیرا اختلاف شیمیایی عناصر، در درجهٔ اول به‌تعداد الکترونهای ظرفیتی بستگی دارد، به‌علاوه تمام واکنشهای‌شیمیایی شامل تشکیل یا شکسته‌شدن پیوندهایند. تاجایی‌که به‌مواد مهندسی مربوط‌می‌شود مهمترین مسئلهٔ مواد مربوط به‌واکنشهای خوددگی (فصل ۱۲) است که در آن جدا شدن یون فلزی از فلز، شامل خروج الکترونهای ظرفیتی از مدار خارجی اتم، و پتانسیل یونش آن است.

درفصلهای بعد، اصولی که ربط‌دهندهٔ خواص مواد مهندسی به‌ساختار موجودند را به‌تفصیل بررسی خواهیم کرد.

## سؤالات تشریحی

۱. فرق بین عدد اتمی و جرم اتمی را ذکر کنید.

۲. توضیح دهید که چرا الکترونها می‌توانند فقط ترازهای برگزیده‌ای از انرژی را در اتم اشغال کنند و تمام ترازهای دیگر ممنوع‌اند.

۳. بامراجعه به‌شکل ۲ـ۱ـ۳، براساس معلومات شیمی خود، شکل مشابهی برای پتاسیم رسم کنید.

۴. بامراجعه به‌شکل ۲ـ۲ـ۱، شکل مشابهی برای kCl رسم کنید.

۵. الگوی «گلوله‌های سخت» برای اتمهای فلز و یونها کاربرد بسیار دارد ولی برای مولکولها کمتر به‌کار می‌رود. چرا؟

۶. الماس کوچکی $10^{20}$ اتم دارد. تعداد پیوندهای کووالانسی آن چندتاست؟

۷. سیلیسیم‌تترافلوئورید ($SiF_4$) ترکیبی‌پایداراست‌ولی‌دمای‌ذوب‌پایینی‌دارد($-77^{\circ}C$). دلیل این‌امر را باتخمین‌زدن ماهیت پیوندهای آن شرح‌دهید (درصورت لزوم ازشکل استفاده کنید).

۸. سولفوردی‌کلرید دارای جرم مولکولی ۱۰۳amu ونقطهٔ جوش $59\ ^{\circ}C$ است. با استفاده ازنمایش نقطه‌ها، نموداری رسم‌کنیدکه نشاندهندهٔ‌ساختار الکترونهای ظرفیتی این ترکیب باشد [شکل ۲ـ۲ـ۳ (الف)].

۹. بااستفاده از نمایش نقطه‌ها، ساختار الکترونی یونهای $ClO_4^-$، $SO_4^{2-}$، $PO_4^{3-}$ و

$SiO_4^{4-}$ را رسم کنید.

۱۰. شکل ۲-۲-۳ (ب) طرحوار رسم شده و در آن محور عمودی نشاندهندهٔ انرژی است. انرژی متوسط الکترونهای ظرفیتی دو اتم مجزای فلوئور (طرف چپ پیکان) و مولکول $F_2$ (طرف راست پیکان) را معین کنید. چرا فلوئورمولکول تشکیل می‌دهد؟

۱۱. گشتاور دوقطبی الکتریکی به‌ترتیب در مولکولهای HF، HCl، HBr و HI کم می‌شود. دلیلی برای آن ذکر کنید.

۱۲. نقطهٔ جوش HBr (−۶۷°C) بالاتراز HCl (−۸۵°C) است، گرچه دوقطبی الکتریکی کوتاهتری دارد، در این‌باره شرح دهید.

۱۳. گوگرد می‌تواند مولکولهای حلقه‌ای با تقریباً هشت اتم تشکیل دهد. با استفاده از «نمایش نقطه‌ای الکترونها» پیوندها را نشان دهید. مولکول گوگرد چه‌نوع پیوندی دارد؟

۱۴. هیدروژن پراکسید ($H_2O_2$) پیوند کووالانسی دارد. ناپایدار است و به‌جای H و OOH به‌آسانی ۲OH تشکیل می‌دهد. دلیل آن را ذکر کنید. یونهای OH حاصل، بسیار فعال‌اند. با استفاده از نقطه‌های نمایش‌دهندهٔ الکترون دلیل آن را شرح‌دهید.

۱۵. انرژی پیوند C≡N در جدول ۲-۳-۱ ذکر نشده است ولی مقدار آن احتمالا ۹۱۵kJ/mole است؛ آیا بیشتر ازآن‌است؛ یا کمتر؟ انتخاب خود را شرح‌دهید.

۱۶. چرا نوترون می‌تواند حتی اگر اتمها با هم «تماس داشته باشند» از میان مواد عبور کند؟

۱۷. باریم در پیوست (ب) نیامده است. براساس جدول تناوبی (شکل ۲-۱-۱) و سایر داده‌های پیوست (ب)، شعاع یون $Ba^{2+}$؛ اتم Ba؛ یون $Ag^{2+}$ را پیش‌بینی کنید.

۱۸. چرا برای نسبت شعاعهای CN = ۶ حدپایینی وجود دارد ولی حدبالا وجودندارد؟

۱۹. عواملی را که برعدد کوئوردیناسیون ترکیبات یونی و ترکیبات کووالانسی اثر می‌گذارند ذکر کنید.

۲۰. مشخص کنید که مواد زیر جزء کدامیك از سه‌نوع مادهٔ بخش ۲-۷ هستند: مفرغ، سیمان پرتلند، سیمان «لاستیك»، چوب، شیشهٔ‌پنجره، باکلیت، زنگ‌فلز، اتیلن گلیکول (ضدیخ).

۲۱. موادی را که بین فلزات و سرامیکها؛ و بین پلی‌مرها و سرامیکها قرار می‌گیرند، ذکر کنید.

۲۲. فلزات مختلف، سرامیکهای مختلف و پلی‌مرهای مختلفی را که برای اجاق آشپزخانه به‌کار می‌روند، ذکر کنید.

۲۳. براساس‌داده‌های‌پاراگراف (۵) قسمت مرور و بررسی مطالب، $\alpha_L$ را برحسب $T_m$ رسم‌کنید. با استفاده از داده‌های کتاب راهنما، فلزات دیگری را به‌این فهرست اضافه‌کنید. نتایج به‌دست آمده را شرح دهید.

۲۴. نقطهٔ ذوب فلزات خالص (+۹۹٪) را که در پیوست (ج) ذکر شده است به‌دست

آورید. این مقادیر را برحسب مدول کشسانی رسم کنید. الگوهای نتایج خود را شرح دهید.

۲۵. طلا و نیکل بین عناصر ذکر شده در پیوست (ب) وجود دارند ولی در پیوست (ج) نیستند. ضریب انبساط گرمایی و مدول کشسانی هریك را تخمین بزنید.

۲۶. گرافیت چندسو است، یعنی خواص آن با جهت، تغییر بسیار می‌کند. شرح دهید که چرا رسانندگی گرافیت درجهت افقی (شکل ۲ـ۲ـ۶) صدبرابر بیشتراز رسانندگی آن درجهت عمودی است.

## مسائل

۲ـ۱ـ۱ الف) جرم اتم آلـومینیم چقدر است؟ ب) چگالی آلومینیم ۲٫۷۰ $Mg/m^3$ (۲٫۷۰ $g/cm^3$) است، درهر $mm^3$ چند اتم وجود دارد؟

جواب: الف) ۴٫۴۸ × $10^{-23}$ $g/atom$؛ ب) ۶٫۰۲ × $10^{19}$ $atoms/mm^3$

۲ـ۱ـ۲ سیمی مسی ۱٫۳۱۲g وزن، ۲٫۱۵ mm قطر و ۴۰٫۵ mm طول دارد. الف) در هر $mm^3$ چند اتم وجود دارد؟ ب) چگالی آن را حساب کنید.

۲ـ۱ـ۳ لحیمی حاوی ۶۰ w/o قلع و ۴۰ w/o سرب است. درصد اتمی هرعنصر چقدر است؟

جواب: ۷۲ a/o Sn؛ ۲۸ a/o Pb

۲ـ۱ـ۴ الف) در هر گرم آهن چند اتم وجود دارد؟ ب) حجم دانه‌ای از فلز که حاوی $10^{20}$ اتم آهن باشد چقدر است؟

**۲ـ۱ـ۵** الف) بـا استفاده از داده‌هـای پیوستها، جرم اتم تنهای نقره را مشخص کنید. ب) درهر $mm^3$ نقره چنداتم وجود دارد؟ ج) براساس چگالی‌آن، حجم دانهٔ نقره‌حاوی $10^{21}$ اتم چقدر است؟ د) فرض کنید اتمهای نقره‌کروی‌اند ($R_{Ag} = 0.1444\ nm$)، و از فضای بین آنها صرفنظر کنید. حجمی‌که $10^{21}$ اتم اشغال می‌کند چقدر است؟ و) چند درصد حجمی از فضا اشغال می‌شود؟

جواب: الف) ۱٫۷۹ × $10^{-22}$ $g/Ag$؛ب) ۵٫۸۶ × $10^{19}$ $Ag/mm^3$؛ ج) ۱۷$mm^3$؛ د) ۱۲٫۶ $mm^3$؛ هـ) ۷۴٪.

**۲ـ۱ـ۶** مسئلهٔ ۲ـ۱ـ۵ را برای نیکل مجدداً حل کنید.

**۲ـ۱ـ۷** الف) چگالی $Al_2O_3$ برابر با ۳٫۸$Mg/m^3$ (۳٫۸ $g/cm^3$) است.درهر $mm^3$ چنداتم وجود دارد؟ ب) درهر گرم چطور؟

جواب: الف) ۱٫۱۲ × $10^{20}$ $atoms/mm^3$ ب) ۲٫۹۵ × $10^{22}$ $atoms/g$

**۲-۱-۸** حجم مکعبی از MgO کـه هرضلع آن ۴۲ nm ره است حاوی ۴یون $Mg^{2+}$ و ۴ یون $O^{2-}$ است. چگالی MgO چقدر است؟

**۲-۱-۹** ترکیبی حاوی ۳۳ a/o Cu و ۶۷ a/o Al است. درصد وزنی هر کدام چقدر است؟

جواب: ۵۴ w/o Cu؛ ۴۶ w/o Al

۲-۱-۱۰ روی سطح بـرنجی ($1610\ mm^2$) پوشش نقره داده شده تاضخامت آن بـه ۷ر۵ μm رسیده است. الف) چه مقدار نقره ($Ag^+$) لازم است؟ ب) برای انجام این کار درمدت ۵ دقیقه چندآمپر لازم است؟

**۲-۱-۱۱** سطح آبکاری شده‌ای ازنقره‌استرلینگ (۹۲ر۵ w/o Ag؛ ۷ر۵ w/o Cu) را می‌خواهیم روی ظرفی نقره‌ای پوشش دهیم. برای پوشش دادن ۱ میلی‌گرم درهر ثانیه چند آمپر لازم است؟ ($Ag^+$ و $Cu^{2+}$.)

جواب: ۱ر۰۵ amp

☐ ۲-۱-۱۲ ترتیب اربیتالها را برای اتم تنهای الف) کلر؛ ب) پتاسیم، مشخص کنید.

☐ **۲-۱-۱۳** ساختار الکترونـی الف) اتمهای زیرکونیم؛ ب) یونهای $Zr^{4+}$ را نشان دهید.

جواب: الف) $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 3d^{10}\ 4s^2\ 4p^6\ 4d^2\ 5s^2$

ب) $1s^2\ 2s^2\ 2p^6\ 3s^2\ 3p^6\ 3d^{10}\ 4s^2\ 4p^6$

☐ **۲-۱-۱۴** تعداد الکترونهای $3d$ را درهریك از یونهای زیر معین کنید.

الف) $Ti^{2+}$ ب) $Ti^{4+}$ ج) $Cr^{3+}$ د) $Fe^{3+}$

ه) $Fe^{2+}$ و) $Mn^{2+}$ ز) $Mn^{4+}$ ح) $Ni^{2+}$

ط) $Co^{2+}$ ی) $Cu^{+}$ ك) $Cu^{2+}$

۲-۲-۱ برای شکستن پیونـد کووالانسی بین کربن و نیتروژن تقریباً $5 \times 10^{-19}$ ژول لازم‌است. برای تأمین این انرژی طول‌موج لازم برای فوتون چقدر است؟ (برای ثابتها پیوست الف را ببینید.)

جواب: ۴۰۰ nm

۲-۲-۲ الکترونی تمام انرژی فـوتون نـور فرابنفش ($\lambda = 276.8\ nm$) را جـذب می‌کند. چند eV جذب می‌شود؟

۲-۳-۱ وزن مولکولی هریك از مولکولهای شکل ۲-۳-۱ را معین کنید.

جواب: الف) ۳۲ ب) ۴۶ ج) ۱۷ د) ۷۸ ه) ۹۲ و) ۳۰ ز) ۵۸ ح) ۶۰ ط) ۲۸ ی) ۵ر۶۲

☐ **۲-۳-۲** ترکیبی آلی حاوی w/o ۱ر۶۲ کربن، w/o ۳ر۱۰ هیدروژن، و w/o ۶ر۲۷ اکسیژن است. یك ترکیب ممکن را نام ببرید.

☐ **۲-۳-۳** به‌شکل ۲-۳-۳ رجوع کنید. متیل یدید ($CH_3I$) ساختاری مشابه دارد؛ ولی زاویهٔ $H-C-H$ برابر با °۴ر۱۱۱ است. زاویهٔ $H-C-I$ در $CH_3I$ چقدر است؟ (این مسئلهٔ هندسه است؛ ولی اعوجاج را در مولکول قطبی نشان خواهد داد.)

جواب: °۵ر۱۰۷

۲-۳-۴ سه ایزومر از چهار ایزومر ممکن بوتانل ($C_4H_9OH$) را رسم کنید.

**۲-۳-۵** ساختار ایزومرهای مختلف اکتان $C_8H_{18}$ را رسم کنید.

☐ **۲-۴-۱** اگر دوقطبی الکتریکی مولکول $۳ر۱ \times ۱۰^{-۳۰}\ C.m$ و زاویهٔ پیوند $H-S-H$ °۹۳ باشد، گشتاور دوقطبی الکتریکی هریك از بازوهای $H-S$ ترکیب $H_2S$ را حساب کنید.

جواب: $۲ر۳ \times ۱۰^{-۳۰}\ C.m$

☐ ۲-۴-۲ فاصلهٔ $H-F$ در HF، ۱ر۰ nm است و درمجموع ۱۰ الکترون موجود است. گشتاور دوقطبی الکتریکی مولکول HF برابر $۶ر۴ \times ۱۰^{-۳۰}\ C.m$ است. الف) مرکز بار منفی تا مرکز بار مثبت (نقطهٔ مبدأ) چقدر فاصله دارد؟ ب) این فاصله چه کسری از کل طول پیوند است؟

☐ ۲-۴-۳ مولکول HCl را به‌صورت $H^+Cl^-$ درنظر بگیرید. اگر گشتاور دو قطبی $۵ر۳ \times ۱۰^{-۳۰}\ C.m$ باشد مراکز دو یون چقدر از یکدیگر فاصله دارند؟

جواب: ۰۲ر۰ nm

☐ ۲-۵-۱ بامراجعه به‌مثال ۲-۵-۱ و توضیحات آن، نیروهای جاذبه و دافعه بین یونهای $Mg^{2+}$ و $O^{2-}$ را الف) در $a = ۲ر۰\ nm$ و؛ ب) در $a = ۲۲ر۰\ nm$ حساب کنید.

جواب: الف) ۲۳ nJ/m، ۳۵− nJ/m؛ ب) ۱۹ nJ/m، ۱۳− nJ/m

☐ ۲-۵-۲ نیروی خالص ($F_C + F_R$) را برای $Mg^{2+} \rightarrow\leftarrow O^{2-}$ برحسب فاصلهٔ بین اتمی از ۱۹ر۰ nm تا ۲۳ر۰ nm یعنی $a_{Mg-O} \pm ۰۲ر۰\ nm$، رسم کنید. (داده‌های لازم را از مثال ۲-۵-۱ ومسئلهٔ ۲-۵-۱ به‌دست آورید.)

**۲-۵-۳** در مسئلهٔ ۲-۵-۲، رسم منحنی را تا تعیین بیشینهٔ نیروی خالص بین یونهای

$Mg^{2+}$ و $O^{2-}$ ادامه دهید. فاصلهٔ حاصل از نیروی بیشینه چقدر است؟

جواب: در ۰٫۲۴ nm، ۱۰٫۳ nJ/m، در ۰٫۲۵ nm، ۱۱٫۰ nJ/m؛ در ۰٫۲۶ nm، ۱۱٫۰۸ nJ/m؛ در ۰٫۲۷ nm، ۱۰٫۹ nJ/m (با قراردادن $d(F_C+F_R)/da=0$، بیشینه در ۰٫۲۵۸ nm است و $[(F_C+F_R)=11.1\ nJ/m]$.

☐ ۲ـ۵ـ۴ طبق محاسبات مثال ۲ـ۵ـ۲، انرژی پیوند $Mg^{2+}\longrightarrow O^{2-}$ را درچندین نقطهٔ برگزیده بین ۰٫۱۹ و ۰٫۲۳ nm یعنی $a_{Mg-O}\pm 0.02\,nm$، حساب کنید.

☐ **۲ـ۵ـ۵** با استفاده از رابطهٔ (۲ـ۵ـ۵) منحنی انرژی را برحسب فاصلهٔ جداکنندهٔ برای $Na^+$ و $Cl^-$ از ۰٫۲۲ تا ۰٫۳۲ nm یعنی $a_{Na-Cl}\pm 0.04\,nm$، رسم کنید. (از مثال ۲ـ۵ـ۱، $b$ برای $NaCl = 10^{-105}\,Jm^9$ ~).

جواب: در ۰٫۲۴ nm، $-0.58\times10^{-18}J$
در ۰٫۲۶ nm، $-0.70\times10^{-18}J$
در ۰٫۲۸ nm، $-0.73\times10^{-18}J$
در ۰٫۳۰ nm، $-0.72\times10^{-18}J$
در ۰٫۳۲ nm، $-0.69\times10^{-18}J$
در ۰٫۲۲ nm، $-0.21\times10^{-18}J$
در ۰٫۴۰ nm، $-0.57\times10^{-18}J$

(راهنمایی: اگر صورت و مخرج کسر به $10^{-90}$ تقسیم شود می‌توان محاسبه را با ماشین حساب انجام داد.)

۲ـ۵ـ۶ براساس داده‌های جدول ۲ـ۵ـ۱ حجمهای کروی $Fe^{2+}$ و $Fe^{3+}$ را مقایسه کنید.

۲ـ۵ـ۷ حجم اتمهای آهن را هنگامی که ۸ و ۱۲ همسایه دارند براساس شعاعهای آنها (جدول ۲ـ۵ـ۱) مقایسه کنید.

جواب:
(در صورت کروی بودن) $V_{CN=8}=0.008\,nm^3$، $V_{CN=12}\sim 0.0086\,nm^3$

۲ـ۵ـ۸ شعاعهای یونی ذکر شده در پیوست (ب) وقتی به‌کار می‌رود که شش همسایه وجود داشته باشد $(CN=6)$، الف) شعاع یونهای هالوژنها، وقتی هشت همسایه داشته باشند، چقدر است؟ ب) شعاع $Zn^{2+}$، وقتی تنها چهارهمسایه داشته باشد چقدر است؟

۲ـ۶ـ۱ مبدأ ۰٫۷۳ را درجدول ۲ـ۶ـ۱ نشان دهید.

جواب: $۲(r+R)=\sqrt{۳}(۲R)$

**۲-۶-۲** الف) شعاع کوچکترین کاتیونی کــه مــی‌تواند بایونهای $O^{2-}$، بدون اعوجاج، عدد کوئوردیناسیون ۶ داشته باشد، چقدر است؟ ب) عدد کوئوردیناسیون ۸ چطور؟

**۲-۶-۳** مبدأ ۲۲ر۰ را در جدول ۲-۶-۱ نشان دهید. (توجه داشته باشید که چهار یون بــزرگ شکل ۲-۶-۱ (ب) را در چهــار گوشهٔ مکعب ویون کوچك را در مرکز مکعب قرار دهید.) (شکل ۲-۳-۳ (الف) را ببینید.)

جواب: $۲(r+R)/\sqrt{۳}=۲R/\sqrt{۲}$

**۲-۶-۴** به‌شکل ۳-۱-۱ نگاه‌کنید. الف) عدد کوئوردیناسیون هریك از یونهای $Na^+$ چقدر است؟ ب) برای هریون $Cl^-$ چطور؟ (فرض‌کنید ساختار باهمین الگو دراطراف شکل موجود ادامه یابد.)

**۲-۶-۵** شش یون $O^{2-}$ در اطراف یــون $Mg^{2+}$ قرار می‌گیرند. یونها را گلوله‌هــای سختی باشعاع ذکرشده درجدول ۲-۵-۱ درنظر بگیرید. فاصلهٔ بین سطوح یونهای $O^{2-}$ چقدر است است؟

جواب: شکاف = ۰۱ر۰ nm

**۲-۶-۶** شش‌یون $Cl^-$ در اطراف یــون $Na^+$ قرارمی‌گیرند. فاصلهٔ بین سطوح کره‌های $Cl^-$ براساس‌داده‌های جدول ۲-۵-۱ چقدر است؟

**۲-۶-۷** الف) از پیوست (ب) سه‌کاتیون دوظرفیتی را ذکرکنیدکه عدد کوئوردیناسیون آنها با $S^{2-}$، ۶است ونه ۸. ب)دویون دوظرفیتی‌راکه‌می‌توانندبا $F^-$ عددکوئوردیناسیون ۸ به‌وجودآورند ذکرکنید.

جواب: ب) Ca، Hg، Pb

# ۳

## نظم اتمی در جامدات

### چشم‌انداز فصل

پس‌از بررسی پیوندهای اتم-به-اتم، قدم بعدی دربررسی ساختار داخلی مواد، مطالعهٔ الگوهای نظم پردامنهٔ اتمهاست. این مطلب در مورد جامدات بلوری نسبتاً آسان است زیرا سلولهای واحدی در آنها تشکیل می‌شوند که درجهات سه‌گانه مرتباً تکرارمی‌شوند. هرسلول واحد تمام ویژگیهای هندسی بلور کامل را دارد.

هدف این فصل، مشاهده و بررسی آرایش اتمی در چند ساختار ساده‌تر (bcc، fcc، hcp) و اعتباربخشیدن به‌حضور این ساختارها درمحاسبات چگالی است.

خواننده باید با نمادهای مکانهای سلول واحد، جهات بلوری، و صفحات بلوری آشنا شود زیرا این مطالب در فصلهای بعد برای ربط دادن ساختار بلوری مواد به‌خواص و رفتار آنها مرتباً به‌کار خواهد رفت.

## هدف از مطالعه

۰۱ تعمیم مفهوم سلول واحد به‌طوری که بتوان از سلول واحد برای تجسم الف) آرایش اتمی موجود، ب) نظم پردامنهٔ موجود درجهات و صفحات مختلف و ج) چگالیهای فشردگی در ۱، ۲، و ۳ بعد استفاده کرد.

۰۲ تعریف الگوهای نظم (به‌نام شبکه) کـه در بعضی فلزات ساده‌تر با آنها برخورد می‌کنیم، به‌ویژه bcc و fcc، وهمچنین سایر الگوها مثل hcp و bct.

۰۳ توانـایی الف) محاسبه و ارتباط دادن شعاع اتمی فلزات به (۱) اندازه سلول‌واحد، (۲) ضرایب‌فشردگی‌اتمی و (۳) چگالی و ب) اصلاح کردن محاسبات مربوط به‌ترکیبات ساده‌ای مانند NaCl.

۰۴ تجسم جهات و صفحات بلوری از شاخصهای آنهـا، به‌طوری‌کـه بعداً بتوانیم‌خواص چندسویی را تعریف‌کنیم بی‌آنکه‌هربار روابط هندسی مربوط به‌آن را شرح دهیم.

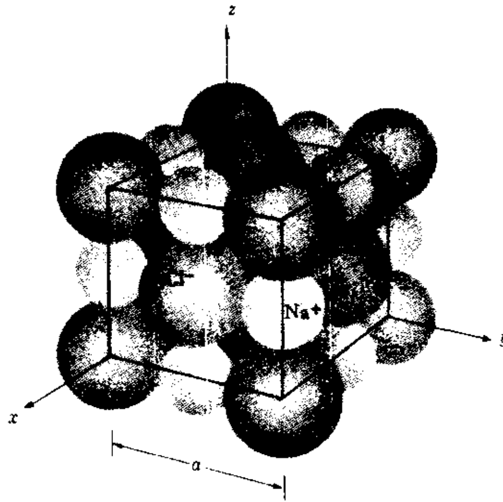
۰۵ اطلاع از اینکه بسیاری از جامدات می‌توانند ساختار بلوری خود را با تغییر دما و یافشار تغییر دهند؛ و اینکه‌این تغییرات مستلزم شکستن پیوندها، حرکت اتمها و تشکیل پیوندهای جدید است که همه‌نیاز بهزمان دارند.

☐ ۰۶ مرور فیزیك مربوط به حرکات موجی به‌طوری که بتوان اساس تفرق اشعهٔ ایکس را، کـه روشی بسیار دقیق است دریافت، این روش می‌توانـد برای به‌دست آوردن فاصلهٔ بین صفحات، شعاع اتمی و ... به‌کار رود.

## ۳-۱ بلورینگی

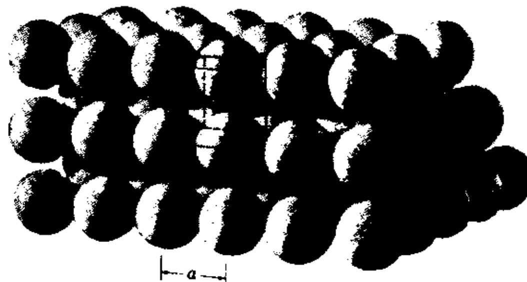
اساساً کلیه‌فلزات، بخش عظیمی از سرامیکها وبعضی از انواع پلی‌مرها در موقع انجماد به‌صورت بلور درمی‌آیند. یعنی براثر این‌عمل اتمهـا به‌صورت منظم، سه‌بعدی و تکرار شونده‌ای آرایش می‌یابند. چنین ساختاری را بلور می‌نامند (شکل ۳-۱-۱).

این نظم پردامنه که چندین فاصلهٔ اتمی امتداد دارد ناشی از کوئوردیناسیون اتمی (بخش ۲-۶) در داخل مـاده است. به‌علاوه این شبکه گـاهی شکل خارجی بلور را نیز تعیین‌می‌کند؛ شکل شش‌بر ذرات برف‌شاید آشناترین مثال دراین مورد باشد. سطح مسطح بلورهای کوارتز ($SiO_2$) و حتی نمك‌طعام معمولی (NaCl) نظم داخلی بلورین آنهارا نشان می‌دهد. درتمام حـالات حتی اگر سطوح خارجی تغییر کنند، آرایش داخلی اتمهـا پایدار می‌ماند. مثلا اگر سطوح بلورهای کوارتز برای تولید شن سیلیکاتی مدور سابیده شود ساختار بلور کوارتز تغییر نمی‌کند. به‌همین‌ترتیب آرایش شش برمولکولهای آب درتکه‌های یخ نیز مانند ذرات برف است.




**شکل ۳-۱-۱** ساختار بلوری. وجوه‌مکعبی نمك‌طعام همان‌وجوه بلوری ساختار NaCl است. MgO نیزساختار مشابهی دارد.

**سلولهای واحد.** درشکل ۳-۱-۲، نظم‌پردامنه که ازمشخصات بلور است، دیده می‌شود. این مدل یکی از چند الگو یا شبکه‌ای است که درصورت وجود تنها یك‌نوع اتم ممکن است به‌وجود آیند. ازآنجا که الگوی اتمی به‌طور نامحدودی تکرار می‌شود، بهتر است شبکهٔ بلوری را به سلولهای واحد تقسیم کرد. سلولهای واحد حجمهای کوچکی‌اند که هرکدام تمام مشخصات موجود در کل بلور را دارند.



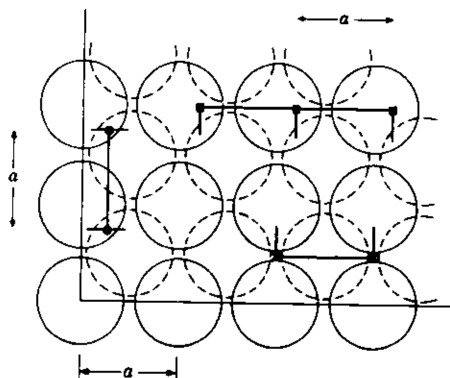

**شکل ۳-۱-۲** سلول واحد. حجم کوچك تکرار شونده در داخل بلور، سلول واحد نامیده می‌شود. اگر بلور مکعبی باشد، ثابت شبکهٔ $a$ در سه جهت مختصات یکسان است.

در الگوی نظم پردامنهٔ بلور، فاصلهٔ تکرار به‌نام ثابت شبکه، اندازهٔ سلول واحد را مشخص می‌کند. بنابراین، $a$، بعد تکرارشوندهٔ شکل ۳ـ۱ـ۲، اندازهٔ ضلع سلول واحد نیز هست. از آنجا که الگوی بلوری شکل ۳ـ۱ـ۲ مشابه با جهات مختصات قائم است این سلول واحد مکعبی است و $a$ ثابت شبکه درهر سه‌بعد است. در بلورهای غیرمکعبی ثابت شبکه درسه جهت مختصات با یکدیگر تفاوت دارد.

گوشهٔ سلول واحد می‌تواند در هرجای بلور قرار گیرد. بنابراین گوشه می‌تواند در مرکز اتم،هرجایی‌درون‌اتم،یاهرنقطه‌ای بین‌اتمها، مثلا نقطهٔ ⊠ شکل ۳ـ۱ـ۳، قرار گیرد. هرجا که واقع‌شود، حجم کوچك توسط حجم مشابهی‌درکنار آن دو برابر می‌شود (به‌شرط آنکه سلول همان جهتگیری الگوی بلوری را داشته باشد) هریك از سلولها تمام صور هندسی کل بلور را دارند.

**سیستمهای بلوری.** بلورهای مکعبی درهرسه‌جهت عمود برهم الگوهای مشابهی دارند: $a_1 = a_2 = a_3$. قسمت اعظم‌فلزات و بخش عمده‌ای از مواد سرامیکی مکعبی‌اند (بلورهای مولکولی به‌ندرت مکعبی‌اند).

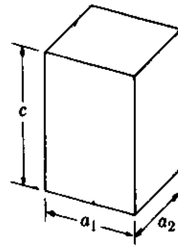
بلورهای غیرمکعبی وقتی به‌وجود می‌آیندکه الگوی تکرار شونده در سه‌جهت مختصات یکی نباشد، یا زاویهٔ بین سه محور بلور $90°$ نباشد. هفت سیستم بلوری مختلف وجود دارد. این سیستمها در جدول ۳ـ۱ـ۱ به‌همراه ویژگیهای هندسی آنها ذکر شده است. در این‌کتاب بیشتر روی بلورهای ساده‌تر ومکعبی قرینه تأکید شده است. ولی باید باسیستم شش برنیز آشنا شویم علاوه براین، به‌بلورهای راست وجهی و مکعب‌مستطیل نیز که دارای واحد بلوری بامشخصاتی طبق شکل ۳ـ۱ـ۴ است، برمی‌خوریم.



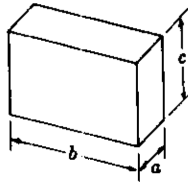

**شکل ۳ـ۱ـ۳** ثابت شبکه. ثابت شبکهٔ $a$ فاصلهٔ تکرار شوندهٔ بین نقاط مشابه در بلور به‌موازات محور بلور است. سلول واحد معمولاً، نه‌الزاماً، با اتمهایی که درگوشه قرار می‌گیرند نشان داده می‌شود.

**جدول ۳-۱-۱** سیستمهای بلوری

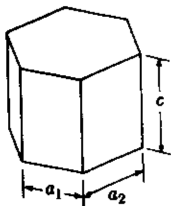
| سیستم | محورها | زوایای بین محورها |
|---|---|---|
| مکعبی | $a_1=a_2=a_3$ | کلیهٔ زوایا = °۹۰ |
| راست وجهی | $a_1=a_2\neq c$ | کلیهٔ زوایا = °۹۰ |
| مکعب‌مستطیل | $a\neq b\neq c$ | کلیهٔ زوایا = °۹۰ |
| کج‌وجهی | $a\neq b\neq c$ | دوزاویه = °۹۰؛یك‌زاویه ≠ °۹۰ |
| متوازی‌السطوح | $a\neq b\neq c$ | زوایای نامساوی و مخالف °۹۰ |
| منشور شش‌بر | $a_1=a_2=a_3\neq c$ | زوایا = °۹۰ و °۱۲۰ |
| لوزوجهی | $a_1=a_2=a_3$ | کلیهٔ‌زوایا مساوی و لی‌مخالف°۹۰ |




(الف)




(ب)




(ج)

**شکل ۳-۱-۴** بلورهای غیرمکعبی. الف) راست وجهی، $a_1=a_2\neq c$، زوایا=°۹۰؛ ب) مکعب مستطیل، $a\neq b\neq c$، زوایا=°۹۰؛ ج) منشور شش بر: $a_1=a_2\neq c$، زوایا =°۹۰ و °۱۲۰.

**مثال ۳-۱-۱** سلول واحد کرم مکعبی است و دو اتم دارد. با استفاده از داده‌های پیوست (ب) ثابت شبکهٔ کرم را معین کنید.

حل: چگالی کرم $۷٫۲۰\ \mathrm{Mg/m^۳}$ است.

$$\text{جرم هرسلول واحد} = \frac{۲\ \mathrm{Cr}(۵۲٫۰\ \mathrm{g})}{۰٫۶۰۲\times ۱۰^{۲۴}\ \mathrm{Cr}}$$

$$= ۱۷۲٫۷۶\times ۱۰^{-۲۴}\mathrm{g}.$$

$$\text{حجم} = a^۳ = \frac{۱۷۲٫۷۶\times ۱۰^{-۲۴}\mathrm{g}}{۷٫۲۰\times ۱۰^۶\mathrm{g/m^۳}}$$

$$= 23{,}994 \times 10^{-30}\ \mathrm{m}^3$$

$$a = 0{,}2884 \times 10^{-9}\ \mathrm{m} \qquad (\text{یا } 0{,}2884\ \mathrm{nm})$$

توضیح. همین‌مقدار ازآزمایش تفرق‌اشعهٔ‌ایکس به‌دست‌آمده است (بخش ۳-۸).■

## ۳-۲ شبکه‌های مکعبی

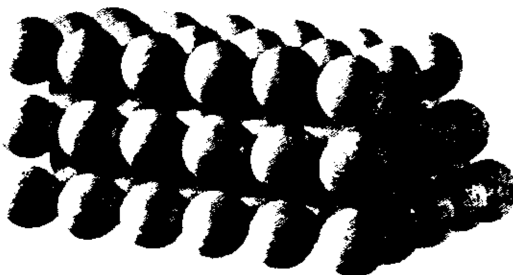
بلورهای مکعبی یکی از سه شبکهٔ زیر را دارند: مکعب ساده، مکعب مرکزدار، و مکعب با وجوه مرکزدار. شبکه، الگوی تکرارشوندهٔ سه‌بعدی است که دربلور گسترش می‌یابد. بخش عمده‌ای از فلزات، دارای شبکهٔ مکعبی مرکزدار (bcc) یا شبکهٔ مکعبی باوجوه مرکزدار (fcc) هستند.

**فلزات مکعبی‌مرکزدار.** آهن‌ساختارمکعبی‌دارد. سلول‌واحدآهن دردمای اتاق درهرگوشهٔ مکعب یك‌اتم و درمرکز مکعب، اتم دیگری دارد (شکل ۳-۲-۱). آهن معروفترین فلزی است که ساختار مکعبی مرکزدار دارد ولی تنها فلزی نیست که دارای این ساختار است. بین‌سایر فلزاتی‌که‌درپیوست (ب)آمده‌اند، کرم‌وتنگستن نیزآرایش‌مکعبی مرکزداردارند.

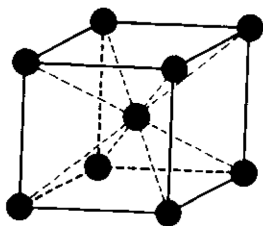
دراین ساختارمکعبی مرکزدار (bcc)، هراتم‌آهن چه درگوشه وچه درمرکز سلول واحدقرارگیرد به‌وسیلهٔ هشت اتم آهن‌مجاور احاطه می‌شود. بنابراین هراتم دارای محیط هندسی کاملا مشابهی‌است [شکل ۳-۲-۱ (الف)]. در ساختار bcc، در هر سلول واحد ۲ اتم وجود دارد. یك اتم درمرکزمکعب و در هشت‌گوشه‌آن هشت تا یك‌هشتم اتم قرار می‌گیرد (شکل ۳-۲-۲). در فلز، ثابت شبکه‌ای این ساختار، $a$، طبق رابطهٔ زیر به‌شعاع اتمی، $R$، مربوط می‌شود

$$(a_{\mathrm{bcc}})_{\text{فلز}} = \frac{4R}{\sqrt{3}} \tag{۳-۲-۱}$$

می‌توانیم ضریب‌فشردگی اتمی (PF) را درمورد فلز bcc به‌کاربریم. فرض براین

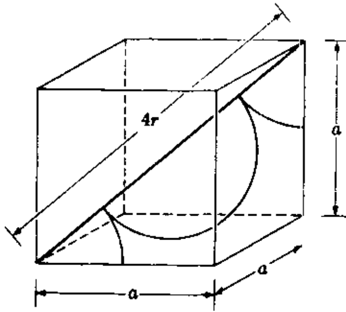


(الف)



(ب)

**شکل ۳-۲-۱** ساختار مکعبی مرکزدار فلز. الف) نمای طرحوار نشاندهندهٔ مکان‌مراکز اتمهاست؛ ب) مدل ساخته شده ازگلوله‌های سخت.






(ب) (الف)

**شکل ۳-۲-۲** سلول واحد مکعبی مرکزدار (فلز). ساختار فلز bcc در هرسلول‌واحد دواتم دارد و ضریب‌فشردگی اتمی آن برابر ۰٫۶۸ است، طبق رابطهٔ (۳-۲-۱)، ثابت شبکه‌ای a به‌شعاع اتمی مربوط می‌شود.

است که اتمها کروی‌اند (مدل گلوله‌های سخت). ضریب فشردگی کسری ازحجم سلول واحد است که توسط این اتمهای کروی اشغال می‌شود

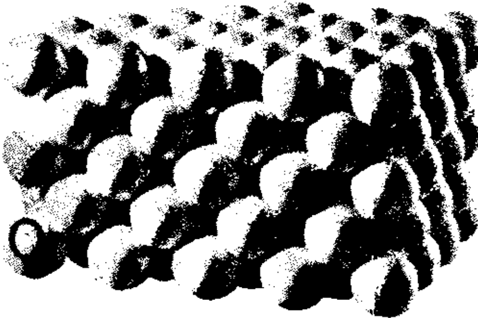
$$\text{ضریب فشردگی} = \frac{\text{حجم اتمها}}{\text{حجم سلول واحد}} \qquad (۳-۲-۲)$$

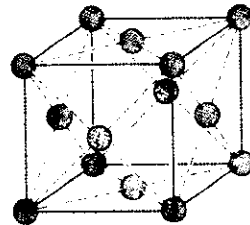
از آنجا که درهرسلول واحد فلز bcc دو اتم وجود دارد،

$$\mathrm{PF} = \frac{۲[۴\pi R^۳/۳]}{a^۳}$$

$$= \frac{۲[۴\pi R^۳/۳]}{[۴R/\sqrt{۳}]^۳} = ۰٫۶۸$$

فلزات مکعبی باوجوه مرکزدار (fcc). گرچه مس ساختارمکعبی دارد ولی آرایش اتمی این





(ب) (الف)

**شکل ۳-۲-۳** ساختارمکعبی باوجوه‌مرکزدار یك فلز. الف) طرح‌وارهٔ مکان مراکز اتمی را نشان‌می‌دهد؛ ب) مدلی که‌از گلوله‌های سخت‌ساخته شده‌است.

عنصر مانند آهن نیست. علاوه بر اتمهای موجود در هر گوشهٔ سلول واحد مس، یك اتم نیز درمرکزهروجه قرارداردولی‌هیچ اتمی‌درمرکزمکعب‌قرارنمی‌گیرد. (شکل ۳ــ۲ــ۳).

ساختار مکعبی باوجوه مرکزدار (fcc) در بین فلزات تاحدودی متداولتراز‌ساختار bcc است. آلومینیم، مس، سرب، نقره، ونیکل همچنین آهن در دماهای بالا دارای این آرایش اتمی‌اند.

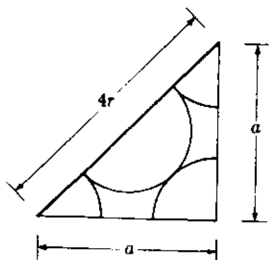
هر فلزی که ساختار fcc داشته باشد، تعداد اتمهای آن چهار برابر تعداد سلولهای واحد آن است. یك هشتم اتم در هر کدام از هشت‌گوشه جمعاً یك اتم می‌شود و شش اتم در مرکز وجوه جمعاً سه‌اتم در هرسلول واحد فراهم می‌آورد (شکل ۳ــ۲ــ۴). در فلز، رابطهٔ ثابت شبکه‌ای، $a$، باشعاع اتمی، $R$، بهصورت زیر است

$$(a_{\text{fcc}})_{\text{فلز}} = ۴R/\sqrt{۲} \qquad (۳\text{–}۲\text{–}۳)$$

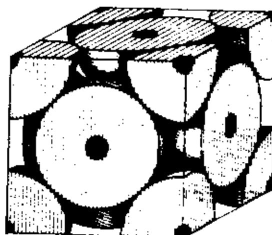
طبق مثال ۳ــ۲ــ۱، ضریب فشردگی فلز fcc ۷۴ر۰ است که از ضریب فشردگی فلز bcc یعنی ۶۸ر۰، بیشتر است. ازآنجاکه در ساختار bcc، هراتم فقط هشت همسایه دارد انتظار چنین اختلافی می‌رود. درفلز fcc هراتم ۱۲ همسایه دارد. این‌مطلب درشکل ۳ــ۲ــ۴ شرح داده شده و دیده می‌شودکه‌اتم موجود درمرکز وجه روبرویی چهارهمسایهٔ مجاور، چهارهمسایه‌که در قسمت پشت در تماس‌اند و چهارهمسایهٔ مشابه در جلو دارد.

**ترکیبات fcc**. طبق شکل ۳ــ۱ــ۱ برای NaCl، ترکیبات نیز می‌توانند شبکهٔ مکعبی باوجوه مرکزدار داشته باشند. مرکز هروجه ازهرجنبه‌ای مشابه با گوشه‌هاست. درترکیب NaCl که درآن اتمهای غیر مشابه با یکدیگر تماس دارند، ابعاد سلول واحد fcc از مجموع دوشعاع به‌دست می‌آید

$$(a_{\text{fcc}})_{\text{NaCl}} = ۲(r_{\text{Na}^+} + R_{\text{Cl}^-}) \qquad (۴\text{–}۲\text{–}۳)$$




(ب)



(الف)

**شکل ۳ــ۲ــ۴** سلول واحد مکعب باوجوه مرکزدار (فلز). ساختار فلزfcc در هرسلول واحد چهار اتم دارد و ضریب فشردگی اتمی آن برابر ۷۴ر۰ است. ثابت شبکه‌ای فلزات، $a$، طبق رابطهٔ (۳ــ۲ــ۳) به‌شعاع اتمی مربوط می‌شود.

از روابط (۳ـ۲ـ۱)، (۳ـ۲ـ۳) یا (۳ـ۲ـ۴) می‌توان حجم سلول واحدرا معین کرد. همچنین تعداد اتمها در سلول واحد، محاسبهٔ جرم آن‌را ممکن می‌سازد. این‌دو توأماً امکان محاسبهٔ چگالی را بما می‌دهند (مثال۳ـ۲ـ۲) از این راه جوابهـای بسیار دقیقی بدست می آید.

**مثال ۳ـ۲ـ۱** الف) ضریب فشردگی اتمی فلز fcc (شکـل ۳ـ۲ـ۴) را محـاسبه‌کنید. ب) ضریب فشردگی یونی NaCl را که fcc است حساب‌کنید (شکل ۳ـ۱ـ۱).

حل: الف) از روابط (۳ـ۲ـ۲) و (۳ـ۲ـ۳) داریم

$$\mathrm{PF}=\frac{۴(۴\pi R^{۳}/۳)}{a^{۳}}=\frac{۱۶\pi R^{۳}(۲\sqrt{۲})}{(۳)(۶۴R^{۳})}=۰٫۷۴$$

ب) بااستفاده ازروابط (۳ـ۲ـ۲) و(۳ـ۲ـ۴)، شکل۳ـ۱ـ۱ و شعاعهای مندرج درپیوست (ب) داریم

$$\mathrm{PF}=\frac{۴(۴\pi r^{۳}/۳)+۴(۴\pi R^{۳}/۳)}{(۲r+۲R)^{۳}}=\frac{۱۶\pi(۰٫۰۹۷^{۳}+۰٫۱۸۱^{۳})}{۳(۸)(۰٫۰۹۷+۰٫۱۸۱)^{۳}}=۰٫۶۷$$

توضیح. از این مثال معلوم می‌شود در صورتی‌که فقط یك اندازهٔ اتمی وجود داشته باشد ضریب فشردگی اتمی به‌اندازه اتم بستگی ندارد. برعکس اگر بیش از یك‌نوع‌اتم وجود داشته باشد، اندازهٔ نسبی اتمها برضریب فشردگی اثر مـی گـذارد. ساختار مکعبی باوجوه مرکزدار دارای بـالاترین ضریب فشردگی اتمی (۰٫۷۴) ممکن بـرای یك فلز خالص است. بنابراین، این ساختار را مـی‌توان ساختار مکعبی فشرده (ccp) نامید. همان‌طور که انتظار می‌رود بسیاری از فلزات چنین ساختاری دارند، گرچه بعداً خواهیم دیدکه در ساختار منشور شش بر فشرده نیز ضریب فشردگی اتمی برابر ۰٫۷۴ است. ▲

**مثال ۳ـ۲ـ۲** مس ساختـار fcc دارد و شعـاع اتمی آن ۰٫۱۲۷۸ nm است. چگالی آن‌را حساب‌کنید و مقدارآن‌را با چگالی موجود در پیوست (ب) مقایسه‌کنید.

حل: از معادلهٔ (۳ـ۲ـ۳)

$$a=\frac{۴}{\sqrt{۲}}(۰٫۱۲۷۸\,\mathrm{nm})=۰٫۳۶۱۵\,\mathrm{nm}$$

از شکل ۳ـ۲ـ۴

$$\frac{\text{اتم}}{\text{سلول‌واحد}}=\frac{۸}{۸}+\frac{۶}{۲}=۴$$

(۳-۲-۵، الف)
$$\text{چگالی}=\frac{\text{سلول واحد/جرم}}{\text{سلول‌واحد/حجم}}$$

(۳-۲-۵،ب)
$$=\frac{(\text{اتم / گرم})(\text{سلول‌واحد/اتم})}{(\text{ثابت شبکه})^۳}$$

$$\text{چگالی}=\frac{۴[۶۳٫۵/(۰٫۶۰۲\times ۱۰^{۲۴})]}{(۰٫۳۶۱۵\times ۱۰^{-۹}\text{m})^۳}=۸٫۹۳\text{Mg/m}^۳(=۸٫۹۳\ \text{g/cm}^۳)$$

مقدار تجربی آن درپیوست (ب) $۸٫۹۲\text{Mgm}^۳$ است. ▲

**مثال ۳-۲-۳** حجم سلول واحد LiF را، که همان ساختار NaClرا دارد، حساب کنید (شکل ۳-۱-۱).

حل: باوجود آنکه LiF، fcc است نمی‌توانیم از شکل هندسی شکل ۳-۲-۴ (ب) استفاده کنیم، زیرا یونهای فلوئور برخلاف اتمهای فلزی با یکدیگر تماس ندارند. در عوض $a$ دوبرابر مجموع $r_{\text{Li}}$ و $R_{\bar{\text{F}}}$ است. (یك‌بار دیگرشکل ۳-۱-۱ را ببینید.) از پیوست (ب)

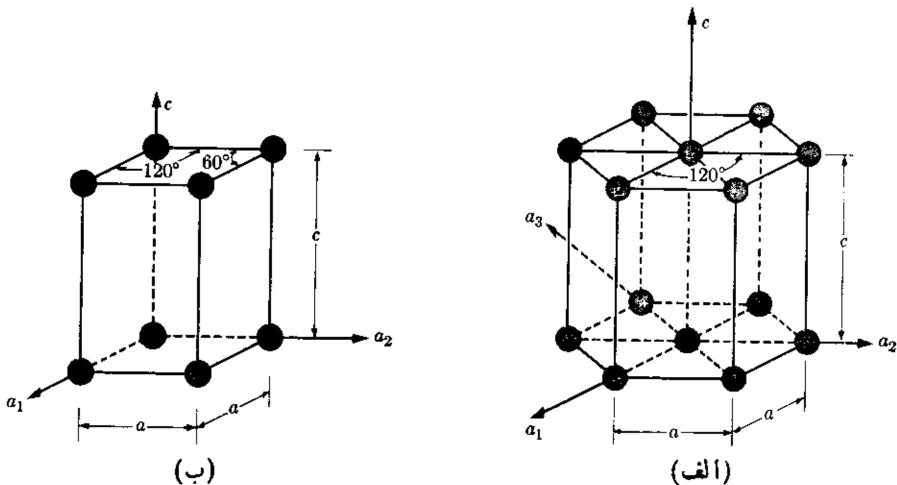
$$a=۲(۰٫۰۶۸+۰٫۱۳۳)\text{nm}$$

$$a^۳=۰٫۰۶۵\ \text{nm}^۳\ \ (\text{یا}\ ۶۵\times ۱۰^{-۳۰}\text{m}^۳)$$

توضیح. از شعاع یونی استفاده می‌کنیم زیرا LiF ترکیبی یونی است. علاوه براین هریون شش همسایه دارد. بنابراین شعاع موجود در پیوست (ب) را نباید اصلاح کرد. ▲

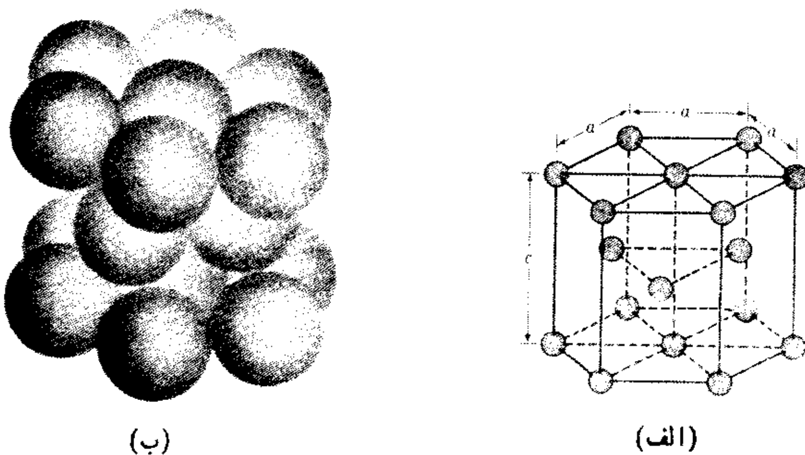
## ۳-۳ بلورهای منشور شش بر

شبکهٔ شکلهای ۳-۳-۱ (الف) و ۳-۳-۱ (ب) دونمونه از سلولهای واحد منشور شش‌بر است. زوایا در قاعده °۱۲۰ (و °۶۰) هستند. در داخل این سلولها هیچ مکانی معادل مکانهای گوشه‌ای نیست. اگرچه حجم سلول شکل ۳-۳-۱ (الف) سه‌برابر حجم سلول شکل ۳-۳-۱ (ب) است ولی تعداد اتمهای موجود در آن نیز سه‌برابر شکل دوم است (۳ در مقابل ۱) و بنابراین تعداد اتمها در واحد حجم یکسان می‌ماند. فلزات با آرایش اتمی مطابق با شکل ۳-۳-۱ بلوری نمی‌شوند زیرا ضریب فشردگی آن بسیارکم است.




**شکل ۳-۳-۱** سلول واحد منشور شش‌بر ساده. الف) نمایش منشور شش‌بر؛ ب، نمایش راست وجهی؛ دو شکل فوق معادل‌اند، $a \neq c$ و زاویه در صفحهٔ قاعده برابر ۱۲۰° و زاویهٔ عمودی برابر ۹۰° است.

**منشور شش‌بر فشرده.** منیزیم ساختار منشور شش‌بـر خاصی طبق شکل ۳-۳-۲ تشکیل می‌دهد. چنین ساختاری که فشرده‌تر از ساختار شکل ۳-۳-۱ است منشور شش بر فشرده (hcp) نـامیده مـی‌شود. مشخصهٔ این ساختار آن است کـه اتمهای هرلایه مستقیماً بـالا




**شکل ۳-۳-۲** ساختار منشور شش‌بر فشرده الف) تصویر طرحواری که مکان مراکز اتمها را نشان می‌دهد؛ ب) مدل ساخته‌شده باگلوله‌های سخت.

یا زیر جاهای خالی بین سه‌اتم لایه‌های مجاور، قرار می‌گیرند. در نتیجه هر اتم در لایهٔ زیر صفحهٔ خود با سه اتم، در صفحهٔ خود با شش اتم و در لایهٔ بالایی با سه اتم درتماس است، بنابراین ۱۲ = CN. در ساختار hcp شکل۳ـ۳ـ۲ به‌طور متوسط شش‌اتم درهر سلول واحد وجود دارد. (یا اگر از شکل راست وجهی استفاده شود در هر سلول واحد ۲ اتم موجود است.)

ضریب فشردگی‌اتمی‌فلز hcp را می‌توان محاسبه‌کرد وعددی برابر۷۴ر۰ به‌دست آورد. این عدد مشابه با ضریب فشردگی اتمی فلزات fcc است‌که قابل پیش‌بینی است زیرا هردو دارای عددکوئوردیناسیون ۱۲ هستند.

**مثال ۳ـ۳ـ۱** ضریب فشردگی اتمی‌منیزیم، مانند تمام فلزات hcp ، ۷۴ر۰ است. حجم سلول واحدآنکه درشکل ۳ـ۳ـ۲ (الف) دیده می‌شود چقدر است؟

حل: در پیوست (ب)، برای منیزیم $\rho = ۱٫۷۴\,\mathrm{Mg/m^۳}$ (یا $۱٫۷۴\,\mathrm{g/cm^۳}$)، وجرم اتمی‌آن ۲۴ر۳۱ amu است. ازشکل۳ـ۳ـ۲ (الف)، $۶ = ۳ + ۲/۲ + ۱۲/۶$ اتم درهرسلول واحد وجود دارد.

$$\text{مبنا: } ۱\,\mathrm{m^۳}\ \frac{(۱٫۷۴ \times ۱۰^{۶}\,\mathrm{g/m^۳})}{۲۴٫۳۱\mathrm{g}/۰٫۶۰۲ \times ۱۰^{۲۴}\,\text{اتم}} = ۴٫۳۱ \times ۱۰^{۲۸}\,\text{اتم}$$

$$\text{حجم سلول واحد} = \frac{۶}{۴٫۳ \times ۱۰^{۲۸}\,\text{اتم}/\mathrm{m^۳}}$$

$$= ۱٫۴ \times ۱۰^{-۲۸}\,\mathrm{m^۳} = ۰٫۱۴\,\mathrm{nm^۳}$$

حل دیگر: پیوست (ب)، $R_{\mathrm{Mg}} = ۰٫۱۶۱\,\mathrm{nm}$ .

$$۶\,\text{اتم}\ \left(\frac{۴\pi}{۳}\right)\frac{(۰٫۱۶۱\,\mathrm{nm})^۳}{۰٫۷۴} = ۰٫۱۴\,\mathrm{nm^۳}$$

توضیح. شعاع متوسط اتم‌منیزیم ۱۶۱ر۰ nm است. ولی‌داده‌های‌تفرق اشعهٔ ایکس نشان می‌دهندکه اتمهای Mg تقریباً ۱ درصد فشرده می‌شوند و به‌صورت کره‌های پهن‌شده درمی‌آیند. (به‌توضیحات مثال ۳ـ۳ـ۲ توجه‌کنید.) ▲

□ **مثال ۳ـ۳ـ۲** با فرض‌کروی بودن اتمها، نسبت $c/a$ یك فلز hcp چقدر است؟

حل: با توجه به‌شکل ۳ـ۳ـ۲ (الف) و درنظرگرفتن سه اتم مرکزی همراه با یك اتم درمرکزقاعدهٔ بالایی، این شکل چهاروجهی، با اضلاع مساوی، $a = ۲R$ ، است. بـا استفاده از روابط هندسی داریم

$$h = a\sqrt{\frac{۲}{۳}}$$

$$c = ۲h = ۲a\sqrt{\frac{۲}{۳}} = ۱٫۶۳a \qquad (۳-۳-۱)$$

توضیح. نسبت $c/a$ فلزات hcp تا حدودی با این عدد تفاوت دارد: برای Mg، ۱٫۶۲؛ برای Ti، ۱٫۵۹؛ و برای Zn، ۱٫۸۵ است. این بدان‌معنی است که باید اتمهای منیزیم و تیتانیم را به‌صورت کره‌های کمی فشرده شده و اتمهای روی را به صورت کره‌های دوکی شکل درنظر بگیریم. ▲

□ **مثال ۳-۳-۳** حجم سلول واحد تیتانیم hcp در $۲۰^\circ$، طبق شکل ۳-۳-۲ (الف) برابر $۰٫۱۰۶\ nm^۳$ است. نسبت $c/a$ برابر ۱٫۵۹ است. مقادیر $c$ و $a$ چقدر است؟ (ب) شعاع Ti درجهتی که روی قاعدهٔ سلول واحد قرار دارد چقدر است؟

حل:

الف) با استفاده از روابط هندسی داریم

$$\text{سطح قاعده} = ۶\left(\frac{۱}{۲}\right)(a)(a\sin ۶۰^\circ) = ۲٫۶۰a^۲$$

$$\text{حجم} = (۱٫۵۹a)(۲٫۶۰a^۲) = ۴٫۱۳a^۳ = ۰٫۱۰۶\ \text{nm}^۳$$

$$a = ۰٫۲۹۵۰\ \text{nm} \quad \text{و} \quad a^۳ = ۰٫۰۲۵۶۶\ \text{nm}^۳$$

$$c = ۱٫۵۹(۰٫۲۹۵\ \text{nm}) = ۰٫۴۶۹\ \text{nm}$$

ب)
$$a = ۲R_{\text{قاعده}} \ ; \ \therefore\ R = ۰٫۱۴۷۵\ \text{nm}$$

توضیح. شعاع متوسط $۰٫۱۴۶\ nm$ است (پیوست ب). اتمهای تیتانیم (و سلول واحدآن) اندکی درجهت $c$ فشرده شده است (به‌توضیحات‌مثال ۳-۳-۲ توجه‌کنید). ▲

## ۳-۴ چندشکلی

در بخش ۳-۲ گفتیم که حتی مولکولهایی که ترکیب شیمیایی مشابهی دارند می‌توانند ساختارهای متفاوتی داشته‌باشند این‌مولکولها را ایزومر می‌نامند. وضعیت مشابهی که برای ما بسیار با اهمیت است درجامدهای بلوری رخ می‌دهد. چندشکلیها دو یا چند نوع مشابه

بلورند که ترکیب شیمیایی یکسانی دارند.* آشناترین مثال دراین مورد وجود دوگانهٔ کربن به‌صورت گرافیت و الماس است.

نخستین مثال برای چندشکلی در فلزات آهن است، زیرا تمام توانایی ما برای عملیات گرمایی فولاد و بهبود بخشیدن به‌خواص آن ناشی از این‌واقعیت است که اگر آهن گرم شود، شبکهٔ آن از bcc به fcc تبدیل می‌شود. به‌علاوه این تغییرشبکه در موقع سردکردن آهن برگشت‌پذیر است. در دمای اتاق عددکوئوردیناسیون آهن bcc برابر ۸، ضریب فشردگی اتمی‌آن برابر ۶۸ر۰ و شعاع اتمی‌آن برابر ۱۲۴۱ر۰ nm است. آهن خالص در ۹۱۲°C به fcc با عددکوئوردیناسیون ۱۲، ضریب فشردگی اتمی ۷۴ر۰ و شعاع اتمی ۱۲۹ر۰ nm تبدیل می‌شود، [در ۹۱۲°C(۱۶۷۳°F) شعاع اتمی آهن bcc به علت انبساط گرمایی ۱۲۶ر۰ nm می‌شود].

بسیاری از ترکیبات دیگر نیز دارای دو یا چندشکل بلوری متفاوت‌اند. در واقع بعضی‌از این‌مواد، مانند SiC، تا ۲۰ حالت بلوری مختلف دارند که البته غیرعادی‌است. به‌طور کلی چندشکلیها درچگالی و سایرخواص اختلافاتی دارند. درفصلهای بعد درمورد تغییرات خواص وزمان‌لازم برای تبدیل یك‌حالت‌بلوری (فاز) به‌حالت دیگربحث خواهد شد.

**مثال ۳-۴-۱** آهن در ۹۱۲°C (۱۶۷۳°F) از bcc به fcc تبدیل می‌شود. دراین دما شعاع اتمی آهن در دوساختار بلوری به‌ترتیب برابر ۱۲۶ر۰ nm و ۱۲۹ر۰ nm است. الف) درصد تغییرحجم، v/o، پس از تغییر ساختارچقدر است؟ ب) درصد تغییر طول، l/o، پس از تغییرساختار چقدر است؟

[قابل ذکر است که طبق جدول ۲-۵-۱ وبخش ۲-۵ هر چه عددکوئوردیناسیون بزرگتر باشد شعاع اتمی بزرگتر است.]

حل: مبنا: ۴ اتم‌آهن، یا دوسلول واحدآهن bcc، و یك سلول واحدآهن fcc.

الف) در bcc، رابطهٔ (۳-۲-۱)

$$\text{حجم} = ۲a_{bcc}^{۳} = ۲\left[\frac{۴(۰{,}۱۲۶)}{\sqrt{۳}}\right]^{۳} = ۰{,}۰۴۹۳\ \text{nm}^{۳}$$

در fcc، رابطهٔ (۳-۲-۳)

$$\text{حجم} = a_{fcc}^{۳} = \left[\frac{۴(۰{,}۱۲۹)}{\sqrt{۲}}\right]^{۳} = ۰{,}۰۴۸۶\ \text{nm}^{۳}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{۰{,}۰۴۸۶ - ۰{,}۰۴۹۳}{۰{,}۰۴۹۳} = -۰{,}۰۱۴ \quad (\text{یا } -۱{,}۴\ v/o\ \text{تغییر})$$

* اگر چندشکلی در جامدات عنصری مثل فلزات دیده شود، گاهی واژهٔ چندگون نیز درمورد آنها به‌کار می‌رود.

ب)

$$\left(1+\frac{\Delta L}{L}\right)^{3}=1+\frac{\Delta V}{V}$$

$$\frac{\Delta L}{L}=\sqrt[3]{1-0.014}-1=-0.0047 \quad (\text{تغییر } 0.47\,l/o-\text{ یا})$$

توضیح. آهن تا دمای $912°C$ در اثر انبساط گرمایی منبسط می‌شود. در این دما انقباضی ناگهانی رخ می‌دهد. ادامهٔ گرمایش موجب انبساط بیشتر می‌شود شکل [۵–۱–۱۰ (الف)]. ▲

**مثال ۳–۴–۲** چگالی یخ و آب در $0°C$ به ترتیب ۰٫۹۱۵ و $1.0005\,Mg/m^{3}$ (یا $g/cm^{3}$) است درصد انبساط حجمی درحین انجماد آب چقدر است؟

حل: مبنا: $1Mg$

$$\text{حجم یخ}=1.093\,m^{3}$$

$$\text{حجم مایع}=0.9995\,m^{3}$$

$$\frac{\Delta V}{V}=\frac{1.093\,m^{3}-0.9995\,m^{3}}{0.9995\,m^{3}}$$

$$=+0.0935 \quad (\text{یا } 9.35\,v/o)$$

توضیح. با تغییرات اصلی که درحین انجماد و آب‌شدن اتفاق می‌افتد آشنا هستیم. اصولا تغییرات چندشکلی مشابه‌اند، یعنی درون جامد، تغییری درساختار به‌وجود می‌آید. این تغییرشامل تغییرحجم، چگالی و تقریباً تمام خواص فیزیکی دیگر است. ▲

## ۳–۵ شکل هندسی سلول واحد

معمولا بلور را در دستگاه مختصاتی نشان می‌دهند که محور $x$ آن به‌طرف ما و محور $y$ آن به‌طرف راست و محور $z$ آن به‌طرف بالاست. بنابراین معمولا مبدأ درطرف چپ، پایین و درقسمت عقب سلول واحد قرار می‌گیرد.* جهت مخالف آن منفی است.

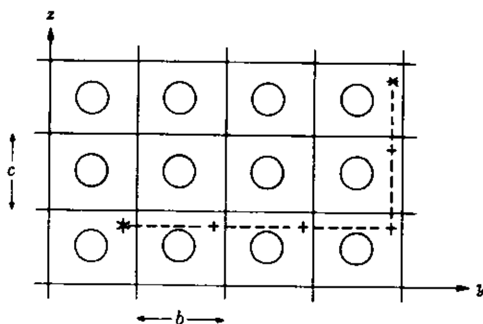
---

* درصورتی‌که دلیلی برای تغییر وجود داشته باشد، خود را به این قرارداد محدود نمی‌کنیم. ولی در توضیحات خود این قرارداد را درنظرمی‌گیریم مگر اینکه به‌صورت دیگری گفته شود. جوابهای شما باید با درنظرگرفتن این قرارداد باشد مگر آنکه درآن نوآرایی به‌کاررفته را شرح داده باشید.

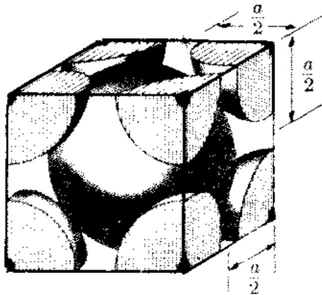
**مکانهای سلول واحد.** هر نقطهٔ روی سلول واحد را می‌توان برحسب ضرایبی درطول سه محور مختصات مشخص کرد، بنابراین مبدأ ۰، ۰، ۰ است. ازآنجاکه مرکز سلول واحد در $c/۲$ ، $b/۲$ ، $a/۲$ قرار دارد، شاخص این مکان ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲ است. همیشه ضرایب مکانها برحسب ابعاد سلولهای واحد بیان می‌شود. بنابراین بدون درنظر گرفتن سیستم بلوری ـ مکعبی، چهاروجهی، مکعب مستطیل، و . . . دورترین رأس سلول واحد، ۱، ۱، ۱ است.

☐ **انتقال.** با انتقال ازهر نقطه‌ای درون سلول واحد به اندازهٔ مضرب صحیح ثابت شبکه ($a$ ، $b$ و یا $c$) محل معادلی درسلول واحد دیگر به‌دست می‌آید. بنابراین درشبکهٔ دوبعدی شکل ۳ـ۵ـ۱، دونقطه‌ای که با * مشخص شده‌اند با انتقال به اندازهٔ $۳b$ (درجهت $y$) و $۲c$ (درجهت $z$) به‌دست آمده‌اند. واضح است که این نمونهٔ غیرمکعبی (یا غیرمربعی) است. ولی درتمام سیستمهای بلوری برای به‌دست آوردن مکانهای معادل مضربهای صحیح به‌کار می‌روند.

درتعدادی ازشبکه‌های فضایی، انتقالهای دیگری نیزوجود دارد. مثلا درشبکهٔ مکعبی مرکزدار، با هر انتقال ۱/۲±، ۱/۲±، ۱/۲± محل معادل دیگری به‌دست می‌آید. واضحترین آن، انتقال از یک گوشه به مرکز سلول به اندازهٔ ۱/۲±، ۱/۲±، ۱/۲± است. ولی باید دانست دومکانی که درشکل ۳ـ۵ـ۲ با علامت * مشخص شده‌اند نیز توسط ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲ــ بههم مربوط می‌شوند. یکی درمرکز ضلع بالایی عقبی قراردارد و دیگری درمرکزوجه سمت راست. هریک از آنها درنیمه‌راه بین دواتم مجاور قراردارند؛ هریک برای چهاراتمی که درجهات °۴۵ قراردارند مرکز به‌حساب می‌آیند. همچنین، نقطهٔ تماس بین دواتم بـا هرنوع انتقال ۱/۲±، ۱/۲±، ۱/۲± تکرار می‌شود. این موضوع، تعریف کلی شبکهٔ مکعبی مـرکزدار است. شبکهٔ مکعبی مرکزدار دارای مکانهای



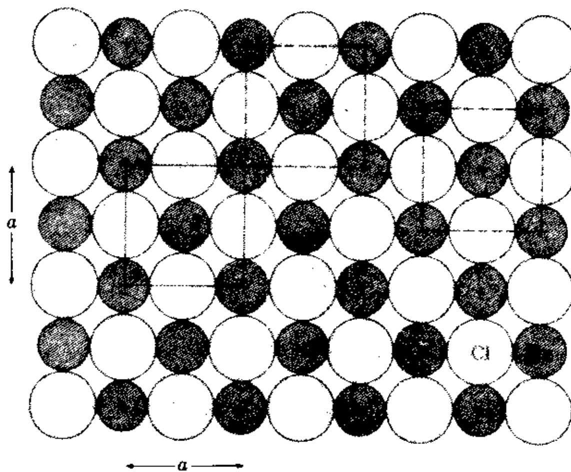

**شکل ۳ـ۵ـ۱** انتقالهای واحد. انتقال تعداد صحیح ابعاد واحد، یعنی ثابتهای شبکه، به‌مکان معادلی منجر می‌شود که از هرجنبه بـا محل مبدأ یکسان است.




**شکل ۳ـ۵ـ۲** انتقال در bcc . با انتقال از هرمکان به‌اندازهٔ $\pm a/۲$ ، $\pm a/۲$ ، $\pm a/۲$ مکانهای معادلی به‌دست می‌آید، مثل * تا *.

معادلی است که با انتقالهای $\pm a/۲$، $\pm b/۲$، $\pm c/۲$ به‌هم مربوط می‌شوند. این‌امر دومکان در هر سلول واحد به‌دست می‌دهد.

درشبکهٔ مکعبی بـا وجوه مرکزدار انتقالهای مختلفی وجود دارد. مثلا شکل ۳ـ۵ـ۳ صفحهٔ گسترش‌یافته‌ای را به‌موازات سطح مکعبی NaCl (شکل ۳ـ۱ـ۱) نشان می‌دهد. با انتقال $\pm a/۲$ ، $\pm a/۲$ دردوبعد ازسه‌بعد، نقطهٔ دیگری به دست می‌آیدکه معادل اولی است (* تا *). دراینجا نیز نقطهٔ اولیه را می‌توان به‌صورت تصادفی انتخاب کرد. اگر بخواهیم صفحات موازی با وجوه دیگر بلور شکل ۳ـ۱ـ۱ را امتحان کنیم، به‌بسط




**شکل ۳ـ۵ـ۳** انتقال در fcc . با انتقال از هر مکان $a/۲$ در دوجهت از سه‌جهت مختصات مثلا * تا * ، مکانهای معادلی به‌دست می‌آیند.

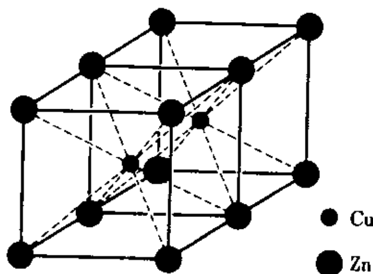
شرح کلی خود درمورد شبکهٔ مکعبی بـاوجوه مرکزدار نیاز داریم. شبکهٔ مکعبی بـاوجوه مرکزدار مکانهای معادلی دارد که باانتقال $\pm a/۲$، ۰، $\pm c/۲$؛ $\pm a/۲$، $\pm b/۲$، ۰ و ۰، $\pm b/۲$، $\pm c/۲$ بههم مربوط می‌شوند و درهرسلول واحد چهار مکان معادل (مکان اول وسه‌مکان دیگر) بهما می‌دهد.

**شبکهٔ مکعبی ساده.** اگرچه در دومین جملهٔ بخش ۳ـ۲ بهشبکهٔ مکعبی ساده اشاره کردیم، ولی آن را شرح ندادیم. برخلاف شبکه‌های bcc و fcc که به‌ترتیب دووچهارمکان معادل درهر سلول واحـد دارنـد. شبکهٔ ساده در هرسلول واحد فقط یك مکان معادل دارد. این الزاماً بدان معنی نیست که چنین بلورهایی «ساده»اند، در حقیقت همیشه بیشتراز یك‌نوع اتم دارند که به‌نوبهٔ خود به‌پیچیدگی آنها می‌افزاید. درعوض انتقال آنها به‌بردارهـای صحیح محدودمی‌شود. شکل ۳ـ۵ـ۴ ساختارترکیب‌مکعبی سادهٔ CsCl را نشان می‌دهد. باوجود آنکه این شکل ساختار bcc را تداعی می‌کند، ولی انتقال $a/۲$، $a/۲$، $a/۲$ از گوشه به‌مرکز سلول واحد دونقطهٔ مشابه را بههم مربوط نمی‌کند. یکی از آنها $Cs^+$ و دیگری $Cl^-$ است. درنتیجه، این ساختار bcc نیست.

**مثال ۳ـ۵ـ۱** الف) یك سلول واحـد غیرمکعبی رسم کنید و مکانهایی را نشان دهید کـه دارای ضرایب زیر هستند.

$$۰,۰,۰;\ ۰,۰,\tfrac{۱}{۲};\ \tfrac{۱}{۲},\tfrac{۱}{۲},\tfrac{۱}{۲};\ \tfrac{۱}{۲},\tfrac{۱}{۲},۰;\ ۱,۱,۰;\ ۱,۱,۱;\ ۱,۱,۲$$

ب) فرض کنید سلول مکعب مستطیل است (تمـام زاویه‌هـای محوری $=۹۰^\circ$)، و $a=۰٫۲۷۰\ nm$، $b=۰٫۴۰۳\ nm$، $c=۰٫۳۶۳\ nm$. فاصلهٔ انتقال $t$ بین‌مکانهـای ۱،۰ ـــ، ۰ و ۲،۱،۱ چقدر است؟




**شکل ۳ـ۵ـ۴** ترکیب مکعبی ساده (برنج $\beta'$). هراتم مس با هشت اتم روی همسایه‌است و هراتم روی باهشت اتم‌مس همسایه‌است. شبکه مکعبی ساده‌است، زیرا مکان مرکز بامکانهای‌گوشه معادل‌نیست. مثال‌این ساختار CsCl [شکل ۸ـ۲ـ۱ (الف)] است.

حل: الف) شکل ۳-۶-۱ (الف) را ببینید.
ب) از آنجا که زوایای محوری °۹۰ هستند،

$$t=\sqrt{[(۱-۰)(۰/۲۷۰\,nm)]^{۲}+[(۱-(-۱))(۰/۴۰۳\,nm)]^{۲}+[(۲-۰)(۰/۳۶۳\,nm)]^{۲}}$$
$$=۱/۱۱۸\,nm$$

توضیح. این روش تشریح مکانهای بلور، ما را به سلول واحد مبنا محدود نمی‌کند. ▲

**مثال ۳-۵-۲** چهارنقطهٔ زیر را دریك سلول واحد درنظر بگیرید

$$\frac{۱}{۴},\frac{۱}{۴},\frac{۳}{۴};\quad \frac{۷}{۸},\frac{۳}{۴},\frac{۱}{۵};$$

$$\frac{۱}{۸},\frac{۱}{۸},\frac{۱}{۸};\quad ۰/۵۳,\ ۰/۲۵,\ ۰/۱۷$$

الف) برای شبکهٔ مکعبی مرکزدار و برای هرچهار نقطه، مکان معادلی در سلول‌واحد مبنا معین کنید.

ب) برای شبکهٔ مکعبی بـا وجوه مرکزدار و برای هرچهار نقطه، سه‌مکان معادل در سلول واحد مبنا معین کنید.

جواب: الف) در شبکـهٔ مکعبی مرکزدار، انتقال بین مکانهـای معادل. $\pm ۰/۵a$ ، $\pm ۰/۵a$ ، $\pm ۰/۵a$ است. بنابراین

برای $\frac{۳}{۴}$ ، $\frac{۱}{۴}$ ، $\frac{۱}{۴}$:

$$(۰/۲۵+۰/۵),\ (۰/۲۵+۰/۵),\ (۰/۷۵-۰/۵)=\frac{۳}{۴},\frac{۳}{۴},\frac{۱}{۴}$$

برای $\frac{۱}{۸}$ ، $\frac{۱}{۸}$ ، $\frac{۱}{۸}$:

$$(۰/۱۲۵+۰/۵),\ (۰/۱۲۵+۰/۵),\ (۰/۱۲۵+۰/۵)=\frac{۵}{۸},\frac{۵}{۸},\frac{۵}{۸}$$

برای $\frac{۱}{۵}$ ، $\frac{۳}{۴}$ ، $\frac{۷}{۸}$:

$$(۰/۸۷۵-۰/۵),\ (۰/۷۵-۰/۵),\ (۰/۲۰+۰/۵)=\frac{۳}{۸},\frac{۱}{۴},۰/۷$$

برای ۰٫۱۷، ۰٫۲۵، ۰٫۵۳:

$$(۰٫۵۳-۰٫۵),\ (۰٫۲۵+۰٫۵),\ (۰٫۱۷+۰٫۵)=۰٫۰۳,\ ۰٫۷۵,\ ۰٫۶۷$$

ب) انتقال در شبکهٔ مکعبی باوجوه مرکزدار باتغییر ۰ و $a$۰٫۵± و $a$۰٫۵± صورت می‌گیرد.

برای $\frac{۱}{۴}، \frac{۱}{۴}، \frac{۳}{۴}$ : $\quad \frac{۳}{۴}, \frac{۳}{۴}, \frac{۳}{۴} \quad \frac{۳}{۴}, \frac{۱}{۴}, \frac{۱}{۴} \quad \frac{۱}{۴}, \frac{۳}{۴}, \frac{۱}{۴}$

برای $\frac{۱}{۸}، \frac{۱}{۸}، \frac{۱}{۸}$ : $\quad \frac{۵}{۸}, \frac{۵}{۸}, \frac{۱}{۸} \quad \frac{۵}{۸}, \frac{۱}{۸}, \frac{۵}{۸} \quad \frac{۱}{۸}, \frac{۵}{۸}, \frac{۵}{۸}$

برای $\frac{۷}{۸}، \frac{۳}{۴}، \frac{۱}{۵}$ : $\quad \frac{۳}{۸}, \frac{۱}{۴}, \frac{۱}{۵} \quad \frac{۳}{۸}, \frac{۳}{۴}, ۰٫۷ \quad \frac{۷}{۸}, \frac{۱}{۴}, ۰٫۷$

برای ۰٫۱۷، ۰٫۲۵، ۰٫۵۳ :

$$۰٫۵۳,\ ۰٫۷۵,\ ۰٫۶۷ \qquad ۰٫۰۳,\ ۰٫۲۵,\ ۰٫۶۷ \qquad ۰٫۰۳,\ ۰٫۷۵,\ ۰٫۱۷$$

توضیح. این انتقالهای درون شبکه‌های مکعبی مرکزدار و مکعبی باوجوه مرکزدار به‌اینکه سیستم مکعبی، مکعب مستطیل (یا چهاروجهی) باشد بستگی ندارد. ▲

**مثال ۳-۵-۳** درشبکهٔ NaCl فواصل بین مرکز یون سدیم و مراکز زیر را حساب کنید

الف) نزدیکترین همسایهٔ آن؛

ب) نزدیکترین یون مثبت به‌آن؛

ج) دومین یون $Cl^-$ نزدیك به‌آن؛

د) سومین یون $Cl^-$ نزدیك به‌آن؛

ه) نزدیکترین مکان معادل آن.

حل: به‌شکل ۳-۱-۱ مراجعه کنید. درپیوست (ب)، شعاع $Na^+$ و $Cl^-$ به‌ترتیب ۰٫۰۹۷nm و ۰٫۱۸۱ nm است (ازآنجا که در هر یك CN=۶ است)

$$a=۲(۰٫۰۹۷+۰٫۱۸۱\ \text{nm})=۰٫۵۵۶\ \text{nm}$$

الف) $$\text{فاصله}=\frac{a}{۲}=۰٫۲۷۸\ \text{nm}$$

ب) $$\text{فاصله}=\sqrt{\left(\frac{a}{۲}\right)^۲+\left(\frac{a}{۲}\right)^۲}=۰٫۳۹۳\ \text{nm}$$

ج) $\text{فاصله} = \sqrt{\left(\frac{a}{۲}\right)^۲+\left(\frac{a}{۲}\right)^۲+\left(\frac{a}{۲}\right)^۲} = ۰٫۴۸۲\ \text{nm}$

د) $\text{فاصله} = \sqrt{\left(\frac{a}{۲}\right)^۲+a^۲} = ۰٫۶۲۲\ \text{nm}$

ه) مشابه با (ب) است زیرا نزدیکترین یونهای $Na^+$ در مکانهای معادل قرار دارند و انتقال برابر است با ۰، $a/۲$، $a/۲$. ▲

**مثال ۳-۵-۴** سزیـم یدید (CsI) ساختاری مطابق شکل ۳-۵-۴ دارد. اگر شعاعهـای سزیـم و ید به‌ترتیب ۰٫۱۷۲ nm و ۰٫۲۲۷ nm باشد، ضریب‌فشردگی آن‌چقدر است؟

حل: : قطر سلول واحد برابر است با $(۲r+۲R)$. بنابراین

$$a=\frac{[۲(۰٫۱۷۲+۰٫۲۲۷)]}{\sqrt{۳}}=۰٫۴۶۱\ \text{nm}$$

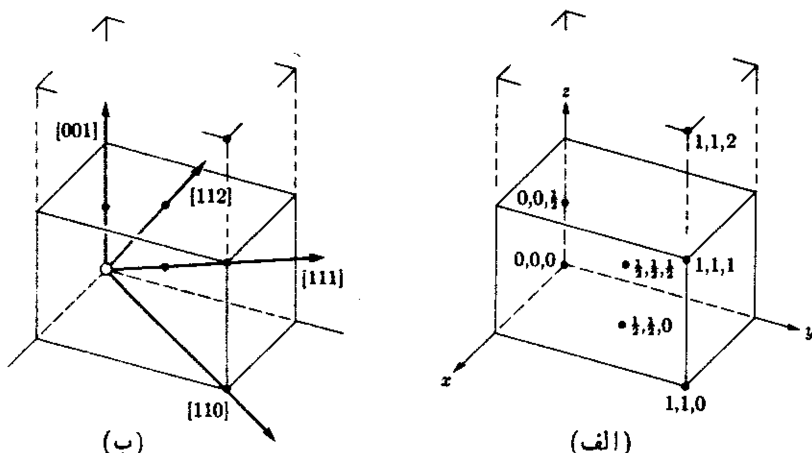
$$\text{ضریب فشردگی}=\left(\frac{۴\pi}{۳}\right)\frac{(۰٫۱۷۲^۳+۰٫۲۲۷^۳)}{(۰٫۴۶۱)^۳}=۰٫۷۲$$

توضیح. ضریب فشردگی بیشتر از مقداری است‌که از محاسبه طبق رابطهٔ (۳-۲-۲) به‌دست می‌آید، زیرا فلز bcc اتم دومی (مختلفی) درمرکز مکعب ندارد.
این شعاع با شعاع به‌دست آمده از پیوست (ب) به‌اندازهٔ عـامل ۰٫۹۷ فرق دارد، زیرا داده‌های‌پیوست‌مربوط به $CN=۶$ است، درصورتی‌که‌دراینجا $CN=۸$ است. ▲

## ۳-۶ جهات بلوری

درفصل بعد زمانی‌کـه رابطهٔ خواص مختلف ماده بـاساختار بلوری آن موردبحث قرار می‌گیرد، لازم است‌کـه جهات ویژهٔ بلوری مشخص باشند، زیرا بعضی از این خـواص جهتدارند مثلاضریب کشسانی آهن bcc به‌موازات قطرمکعب بیشترازمقدار آن‌به‌موازات ضلع مکعب است. برعکس نفوذپذیری‌مغناطیسی آهن به‌موازات ضلع مکعب سلول واحد بیشتر است.

**جهات.** جهات بلوری را باخطی‌کـه از مبدأ به‌مکانهایی با پایینترین شاخص صحیح وصل می‌شود، به‌سادگی نشان می‌دهند (شکل ۳-۶-۱). بنابراین جهت [۱۱۱] خطی است که مبدأ (۰، ۰، ۰) را به‌نقطهٔ ۱، ۱، ۱ وصل می‌کند. با این‌حال‌باید دانست که این امتداد از نقطهٔ ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲ (و ۲، ۲، ۲) نیز عبور مـی‌کند. بـه‌همین ترتیب [۱۱۲] از ۱، ۱/۲، ۱/۲ مـی‌گذرد ولی برای سهولت از اعداد صحیح استفاده می‌شود. می‌بینید کـه




**شکل ۳-۶-۱** الف) مکانهای سلول‌واحد مکعب‌مستطیل. ب) جهات بلوری. مکان مبدأ معمولا و نه لزوماً، درگوشه پایین سمت‌چپ درقسمت عقب است. به‌طور کلی از علامت $[uvw]$ برای نشان‌دادن جهت بخصوص و از علامت $\langle uvw \rangle$ برای نشان‌دادن جهات هم‌خانواده استفاده می‌شود این کار برای اجتناب از اشتباه‌کردن با علامت صفحات $(hkl)$ صورت می‌گیرد. مکانها را بدون واحدهای محوری $x$ و $y$ و $z$ نشان می‌دهند.

شاخصهای جهتها را در $[uvw]$ قرار داده از حروف $u$، $v$ و $w$ برای مشخص کردن شاخص جهات به‌ترتیب درجهات اصلی $x$، $y$ و $z$ استفاده می‌شود. جهات موازی همیشه دارای شاخصهای یکسان‌اند. درنهایت ممکن است ضرایب منفی نیز داشته باشند که باعلامت‌منفی در بالای‌عدد نشان‌داده می‌شود؛ جهت $[11\bar{1}]$ دارای مؤلفه‌ای درجهت منفی محور $z$ است.

**زاویهٔ بین جهات بلوری.** در بعضی از محاسبات خاص (مثلا تنشهای برشی تفکیك شده) لازم است زاویهٔ بین دوجهت مختلف بلوری محاسبه شود. در اغلب محاسباتی که باید انجام‌دهیم، زاویه را می‌توان به‌سادگی به‌دست آورد. در شکل ۳-۶-۱ زاویهٔ بین‌جهات $[110]$ و $[112]$ (یعنی $[112]\measuredangle[110]$) برابر $\arctan 2c/\sqrt{a^2+b^2}$ است. اگر به‌جای مکعب مستطیل، شبکهٔ بلوری مکعبی باشد که درآن $a=b=c$ است، زاویهٔ آن برابر $\arctan 2a/a\sqrt{2}$ یا $\arccos a\sqrt{2}/a\sqrt{6}$ است. درواقع(فقط) برای بلورهای مکعبی می‌توان $\cos [uvw]\measuredangle[u'v'w']$ را به‌وسیلهٔ حاصلضرب عددی به دست آورد. ازروش اخیر دراین کتاب بسیار استفاده شده است، زیرا اغلب محاسبات مربوط به‌بلورهای مکعبی قرینه است.

□ **چگالی خطی.** فاصلهٔ تکرار شوندهٔ بین‌مکانهای معادل درجهات‌مختلف و درشبکه‌های

مختلف تفاوت دارد. مثلا درجهت [۱۱۱] فلز bcc، مکان معادل شبکه به‌فاصلهٔ هر $2R$ یا $a\sqrt{3}/2$ تکرار می‌شود. فاصلهٔ تکرار شونده درجهت [۱۱۰] بلور bcc برابر $a\sqrt{2}$ است، ولی درfcc، $a/\sqrt{2}$ است. این مقادیر را می‌توان ازشکلهای ۳-۲-۱ و ۳-۲-۳ نیز به‌دست‌آورد.

از طرف دیگر، عکس این فواصل، چگالی خطی مکانهای معادل است. بنابراین در جهت [۱۱۰] آلومینیم که دارای‌شبکهٔ fcc باضلعی برابر ۰٫۴۰۵ nm است، چگالی خطی برابر با ۱ تقسیم‌بر $a/\sqrt{2}$، یا $\sqrt{2}/(0.405 \times 10^{-6}\text{mm})$ است که مساوی $3.5 \times 10^{6}/\text{mm}$ می‌شود

$$\text{چگالی خطی} = \frac{\text{عدد}}{\text{طول واحد}} \qquad (۳-۶-۱)$$

درفصل ۶ خواهیم دیدکه تغییرشکل دراین جهات‌که بیشترین چگالی خطی مکانهای معادل را دارند، بسیار آسانتر رخ می‌دهد.

در بیشتر فلزات در هرمکان شبکه یك‌اتم وجود دارد؛ بنابراین چگالی خطی اتمها با چگالی‌خطی مکانهای‌معادل‌برابر است. باوجود این، طبق‌مثال ۳-۶-۴ دربعضی بلورها این‌دو می‌توانند متفاوت باشند. در بلور مکعبی جهات زیر مشابه‌اند، به‌استثنای حالتی که درآن محورهای $x$، $y$ و $z$ طور دیگری انتخاب شوند.

$$[\bar{1}11]\ [1\bar{1}1]\ [11\bar{1}]\ [111]$$

$$[1\bar{1}\bar{1}]\ [\bar{1}1\bar{1}]\ [\bar{1}\bar{1}1]\ [\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$$

هرخاصیت جهتداری* در این‌هشت جهت یکسان است. بنابراین برای مشخص‌کردن این جهات هم‌خانوادهٔ بلوری به‌جای نوشتن هرهشت جهت بهتر است‌آن را با ⟨۱۱۱⟩ مشخص کنیم. لازم به‌تذکر است‌که دراینجا نماد به‌کار رفته ⟨ ⟩ است.

**مثال ۳-۶-۱** تمام جهات موازی‌دارای شاخصهای جهتی یکسان‌اند. خطوطی را درجهت [$1\bar{2}0$]، از مکانهای زیر رسم‌کنید الف) ۰،۰،۰؛ ب) ۰،۱،۰؛و ج) ۱،۱،۱/۲.

حل: شکل ۳-۶-۲ (الف) را ببینید. ▲

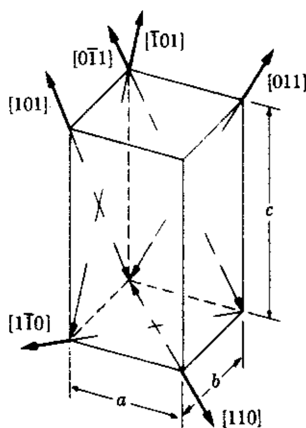
**مثال ۳-۶-۲** جهات هم‌خانوادهٔ ⟨۱۰۱⟩ در بلورهای زیر شامل چه‌جهات مجزایی‌اند؟
الف) در بلورمکعبی؛ □ ب) در بلور چهاروجهی.

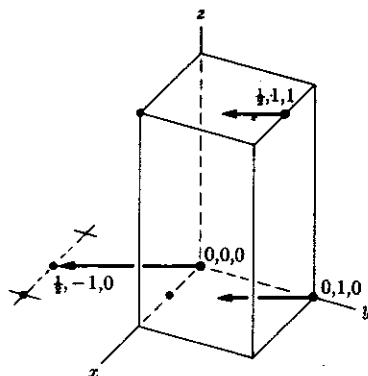
حل: الف) دربلورمکعبی $a = a = a$. بنابراین

$$[0\bar{1}\bar{1}]،\ [10\bar{1}]،\ [1\bar{1}0]،\ [011]،\ [101]،\ [110]$$

---

* مثلا مدول یانگ، نفوذپذیری مغناطیسی، شاخص تفرق و ...




**شکل ۳ـ۶ـ۲** جهات بلوری. الف) [۱۲̅۰] (مثال ۳ـ۶ـ۱ را ببینید)، ب) ⟨۱۰۱⟩[مثال ۳ـ۶ـ۲ (ب) را ببینید].

ب) در سلولهـای چهاروجهی $a=a\neq c$ [شکـل ۳ـ۶ـ۲ (ب)]. بنابراین فقط شاخصهای $u$ و $v$ در ⟨$uvw$⟩ قابل جابجایی‌اند؛ شاخص $w$ چنین نیست.

$$[۰۱۱]،\ [\bar{۱}۰۱]،\ [۰۱۱]،\ [۱۰۱]$$

توضیح. جهـات [۱۰۱̅] و [۱۰۱̅] را معمولا دوصـورت مختلف یـك‌جهت درنظر می‌گیریم ولی، درصورت دلخواه مـی‌توان شاخصهای منفی هریك از جهات بالا را نیز ذکر کرد.
▲

**مثال ۳ـ۶ـ۳** الف) زاویـهٔ بین جهـات [۱۱۱] و [۰۰۱] در بلور مکعبی چقدر است؟ ب) [۱۱۱]∢[۱̅۱̅۱] چطور؟

حل: باتوجه به مکعب شکل ۳ـ۶ـ۱ (ب)

الف)
$$\cos[۱۱۱]\sphericalangle[۰۰۱]=\frac{a}{a\sqrt{۳}}$$

$$[۱۱۱]\sphericalangle[۰۰۱]=۵۴٫۷۵^\circ$$

ب) باتوجه به‌اینکه [۰۰۱] زاویهٔ [۱̅۱̅۱]∢[۱۱۱]را نصف می‌کند، بنابراین

$$[۱۱۱]\sphericalangle[\bar{۱}\bar{۱}۱]=۲(۵۴٫۷۵^\circ)=۱۰۹٫۵^\circ$$

یا، با استفاده از حاصلضرب عددی (چون بلور مکعبی است) داریم

$$\cos[۱۱۱]\measuredangle[\bar{۱}\bar{۱}۱] = -\frac{۱}{۳}$$

$$[۱۱۱]\measuredangle[\bar{۱}\bar{۱}۱] = ۱۰۹٫۵^\circ$$

توضیح. این‌نتایج را باشکل ۲ـ۳ـ۳ (الف) که درآن هرچهار زاویهٔ پیوند برابر ۱۰۹٫۵° است مقایسه کنید. ▲

□ مثال ۳ـ۶ـ۴ ثابت شبکه‌ای الماس، $a$، که بلوری مکعبی است برابر ۳۵۷ nm ر۰ است. الف) چگالی خطی مکانهای معادل درامتداد [۱۱۱] چقدراست؟ب) چگالی اتمی چقدراست؟

حل: با استفاده ازشکل ۲ـ۲ـ۴، اتم گوشهٔ چپ بالا درقسمت عقب مکعب را به‌عنوان مبدأ درنظر بگیرید. الف) درجهت [۱۱۱] فاصلهٔ تکرار شونده ۰، ۰، ۰ تا ۱، ۱،۱ — برابر $a\sqrt{۳}$ یا ۶۱۸ nm ر۰ است بنابراین،

$$\text{چگالی خطی} = \frac{۱}{۰٫۶۱۸ \times ۱۰^{-۶}\text{mm}} = ۱٫۶ \times ۱۰^{۶}/\text{mm}$$

ب) درنقاط ۰، ۰، ۰ و ۱/۴، ۱/۴، ۱/۴ — اتمهایی وجود دارد بنابراین

$$\frac{\text{۲ اتم}}{a\sqrt{۳}} = ۳٫۲ \times ۱۰^{۶}/\text{mm}$$

توضیح. مکان اتم ۱/۴، ۱/۴، ۱/۴ — را می‌توان با مربوط کردن آن به‌چهار اتم همسایه‌اش درنقاط زیر تعیین کرد

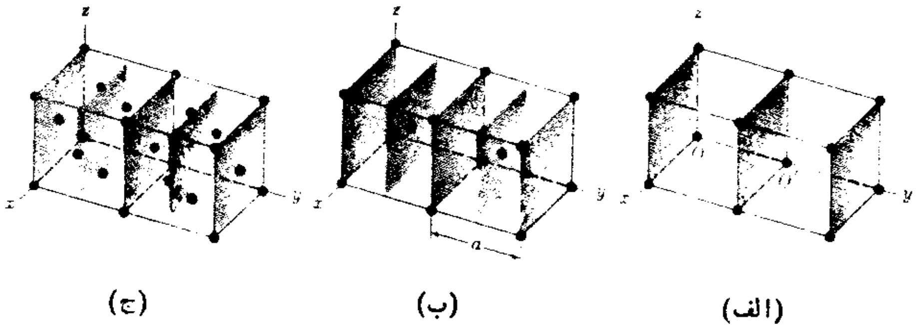
$$۰,۰,۰ \qquad \frac{۱}{۲},\frac{۱}{۲},۰ \qquad \frac{۱}{۲},۰,-\frac{۱}{۲} \qquad ۰,\frac{۱}{۲},-\frac{۱}{۲}$$

▲

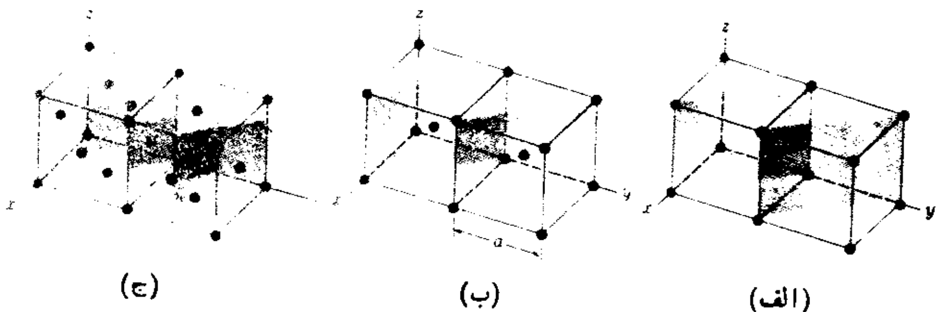
## ۳ـ۷ صفحه‌های بلوری

بلور شامل صفحه‌های اتمی است که برخواص و رفتار ماده اثر می‌گذارند. بنابراین لازم است صفحه‌های مختلف داخل بلور مشخص شوند.

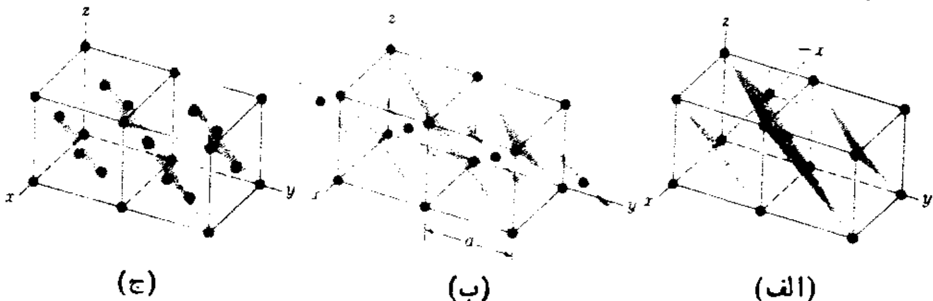
ساده‌ترین صفحه‌های شبکه‌ای آنهایی‌اند که سلول واحد را احاطه کرده‌اند ولی صفحات متعدد دیگری نیز وجود دارد. مهمترین آنها، در شکلهای ۳ـ۷ـ۱ ، ۳ـ۷ـ۲و ۳ـ۷ـ۳ رسم شده‌اند؛ آنها را به‌ترتیب به‌صورت (۰۱۰)، (۱۱۰)و(۱۱$\bar{۱}$) نامگذاری می‌کنند، اعداد داخل پرانتزها $(hkl)$ را شاخص میلر می‌نامند.




**شکل ۳-۷-۱** صفحات (۰۱۰) در ساختارهای مکعبی. الف) ساختار مکعبی ساده؛ ب) bcc؛ ج) fcc. [صفحات (۰۲۰) که جزء bcc، fcc هستند، با صفحات (۰۱۰) یکسان‌اند.]




**شکل ۳-۷-۲** صفحات (۱۱۰) درساختارهای مکعبی. الف)ساختارمکعبی ساده؛ ب)bcc؛ ج) fcc. [صفحات (۲۲۰) که جزء fcc هستند، باصفحات (۱۱۰) یکسان‌اند.]




**شکل ۳-۷-۳** صفحات (۱۱آ) در ساختارهای مکعبی. الف) مکعبی ساده؛ ب) bcc؛ ج) fcc. تقاطعهای منفی باعلامت منفی روی شاخص نشان داده می‌شود. [صفحات (۲۲۲) که جزء bcc هستند، باصفحات (۱۱آ) یکسان‌اند.]

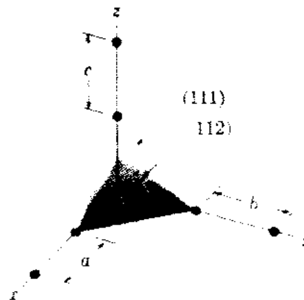
**شاخص میلر.** با استفاده از صفحهٔ تیره‌تـر شکل ۳ــ۷ــ۴ مـی‌توان چگونگی تعیین اعداد ($hkl$) صفحه‌های بلوری را شرح داد. این صفحه محورهـای $x$، $y$، و $z$ را درنقاط ۱$a$، ۱$b$، $c$ ۵ره قطع‌می‌کند. شاخص میلر این‌صفحه به‌آسانی از معکوس کردن مختصات محل برخورد آن بامحورها به‌دست‌می‌آید:(۱۱۲). صفحهٔ روشنترشکل ۳ــ۷ــ۴، صفحهٔ (۱۱۱) است‌زیرا این‌صفحه‌محورها را در ۱$a$، ۱$b$، ۱$c$ قطع‌می‌کند. باتوجه‌به‌شکلهای قبل داریم

| شکل | صفحه | محل تقاطع | شاخص میلر |
|---|---|---|---|
| ۳ــ۷ــ۱ (الف) | وسط | $\infty a$، ۱$b$، $\infty c$ | (۰۱۰) |
| ۳ــ۷ــ۲ (الف) | چپ | ۱$a$، ۱$b$، $\infty c$ | (۱۱۰) |
| ۳ــ۷ــ۳ (الف) | وسط | ۱$a$—، ۱$b$، ۱$c$ | ($\bar{1}$۱۱) |

باید دانست که تقاطع منفی را باعلامت منفی در بالای شاخص میلر مربوط به آن مشخص می‌کنند. علاوه‌براین دیده می‌شود که از پرانتز ($hkl$) برای نشان دادن صفحات (بدون ویرگول) استفاده می‌شود تـا باجهاتی کـه دربخش ۳ــ۶ به‌صورت [$uvw$] نشان داده شد، اشتباه نشود.

کلیه صفحه‌های‌موازی باشاخصهای‌یکسانی‌مشخص می‌شوند. شکل ۳ــ۷ــ۱ (الف) این مطلب را نشان می‌دهد.

چون انتخاب مبدأ، $O$ یـا $O'$ اختیاری است مـی‌تـوان از $\left(0\frac{1}{2}0\right)$ یا (۰۱۰) به‌عنوان شاخص صفحهٔ دست راستی استفاده کرد. چون گفتن و نوشتن شاخصهای (۰۱۰) آسانتر است بنابراین از آنهـا استفاده مـی‌شود و این کاملا مجاز است زیـرا سه‌صفحهٔ




**شکل ۳ــ۷ــ۴** شاخصهای میلر. صفحهٔ (۱۱۲) سه محور را در فواصل ۱، ۱، و ۱/۲ واحد قطع می‌کند.

| صفحه | مبدأ | تقاطع | شاخص میلر |
|---|---|---|---|
| راست | $O$ | $\infty a$، $2b$، $\infty c$ | $(0\frac{1}{2}0)$ |
| راست | $O'$ | $\infty a$، $1b$، $\infty c$ | $(010)$ |
| چپ | $O'$ | $\infty a$، $-1b$، $\infty c$ | $(0\bar{1}0)$ |

هاشورخورده ازنظر هندسی کاملا مشابه‌اند و درخلال تغییر شکل پلاستیکی (فصل ۶)، و تحت شرایط دیگر یکسان عمل می‌کنند. از این مطلب درشکل ۳ـ۷ـ۱ (ج) نیز می‌توان استفاده کرد:

| صفحه | تقاطع | شاخص میلر |
|---|---|---|
| سومی از چپ | $\infty a$، $1b$، $\infty c$ | $(010)$ |
| دومی از چپ | $\infty a$، $0.5b$، $\infty c$ | $(020)=(010)$ |

این صفحه‌ها نیز موازی و مشابه‌اند (ولی محورهای $x$ و $z$ را به‌فاصلهٔ ۱/۲ قطع می‌کنند). معمولا احتیاجی به‌مشخص کردن صفحات $(010)$ از $\left(0\frac{1}{2}0\right)$ و $(020)$ نیست. علاوه براین درشکل۳ـ۷ـ۲(ج) صفحهٔ $(220)$ کاملا مشابه باصفحهٔ $(110)$ است وصفحهٔ $(\bar{2}22)$ همان صفحهٔ $(\bar{1}11)$ است [شکل ۳ـ۷ـ۳ (ب)]. در نتیجه از شاخصهایی با کوچکترین مجموعهٔ اعداد صحیح استفاده می‌کنیم. اکنون می‌توان تعریف دقیقتری از شاخص میلر ارائه داد. شاخص میلر عکس نقاط تقاطع صفحه باسه‌محور است‌که به‌صورت کسری نباشد و مضرب مشترك نداشته باشد.*

**صفحه‌های هم‌خانواده.** بسته‌به‌سیستم بلوری دو یاچندصفحه نیز ممکن است به‌یك‌خانواده از صفحه‌ها متعلق باشند. مثالی ازصفحات چندگانه درسیستم مکعبی که صفحات هم‌خانواده یا شکل را تشکیل می‌دهند بدین‌قرار است:

$$\left.\begin{matrix}(100) & (010) & (001)\\ (\bar{1}00) & (0\bar{1}0) & (00\bar{1})\end{matrix}\right\} = \{100\}$$

* این تعریف درمورد فواصل بین صفحه‌ای ($d_{020}$، ...) کـه در بخش ۳ـ۸ آمده، بـه‌کار نمی‌رود. زیرا این فواصل، صفحه نیستند بلکه فاصلهٔ بین جفت صفحات‌اند.

علامتی که برای صفحه‌های هم‌خانواده به‌کار می‌رود به‌صورت $\{hkl\}$ است. شکل ۳ـ۱ـ۱ صفحه‌های هم‌خانوادهٔ {۱۰۰} را نشان می‌دهد که شامل شش‌صفحه‌ای است که دربالا ذکر شد. کلیهٔ وجه‌ها مشابه‌اند مگر علامتها وجهتهای محورهـا به‌طور فرضی تغییر داده شود. خواننده باید با به‌حساب آوردن کلیهٔ ترکیبات و تبدیلات صفحات مجزا، نشان دهد کـه خانوادهٔ {۱۱۱} شامل هشت‌صفحه و خانوادهٔ {۱۱۰} شامل ۱۲ صفحه است.

□ **شاخصهای صفحات بلورهای منشور شش‌بر** $(hkil)$. شاخص سه‌گـانهٔ میلر $(hkl)$، می‌تواند کلیهٔ صفحات ممکن را درهر بلوری مشخص کند. با این‌حال درسیستمهای منشور شش‌بر اغلب چهارمحور استفاده می‌شود کـه سه‌محور آن هم‌صفحه‌انـد [شکل ۳ـ۳ـ۱ (الف)]. انتخاب این چهار مـحور، چهارخط متقاطع و شاخصهـای $(hkil)$ را به‌وجـود می‌آورد.* چهارمین رقم این شاخص $(i)$، رقمی اضافی است‌که ازنظر ریاضی با مجموع رقمهای اول و دوم متناسب است

$$h+k=-i \qquad (۳ـ۷ـ۱)$$

کاربرد شاخصهای اختیاری $(hkil)$، معمولا برای سیستم منشور شش‌بر مناسب است زیرا تقارن‌سیستم را به‌صورت روشنتری بیان‌می‌کند و گرچه‌شاخص اندکی زاید به‌نظر می‌رسد، ولی در مقالات علمی مـربوط به‌منشورهـای شش‌بر تقریباً همیشه برشاخصهـای $(hkl)$ ارجحیت دارد.

**چگالی صفحه‌ای اتمها.** بعداً وقتی‌که تغییر شکل پلاستیکی موردبحث قرار می‌گیرد،لازم است نسبت به‌چگالی اتمهای صفحهٔ‌بلور آگاهی داشته باشیم. مثال ۳ـ۷ـ۳ نشان می‌دهد که چگونه می‌توان آن را از رابطهٔ زیر به‌دست‌آورد

$$\text{چگالی صفحه‌ای} = \frac{\text{تعداد اتمها}}{\text{سطح واحد}} \qquad (۳ـ۷ـ۲)$$

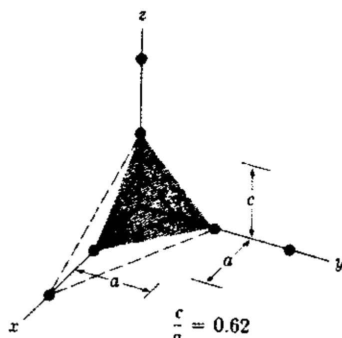
به‌همان طریقی که درمورد چگالی خطی عمل شد مـی‌توان چگالی صفحه‌ای نقاط معادل را نیز محاسبه کرد.

**مثال ۳ـ۷ـ۱** صفحهٔ (۱۱۱) را درسلول واحدی از بلور راست وجهی ساده‌ای‌که درآن $c/a=$ ۰٫۶۲ است، رسم‌کنید.

حل: شکل ۳ـ۷ـ۵ این صفحه را نشان مـی‌دهد (صفحهٔ تیره‌شده). صفحهٔ (۱۱۱) سه‌محور را در فواصل واحد از مبدأ قطع می‌کند. اگر چه‌فاصلهٔ واحد در امتداد محور $z$ کوتاهتر از فواصل واحد در امتداد محورهای $x$ و $y$ است. ▲

---

* شاخص میلر ـ براوه نامیده می‌شود.




**شکل ۳-۷-۵** تقاطعهای غیرمکعبی (ساختار راست وجهی). صفحه تیره شدهٔ (۱۱۱) سه‌محور هر بلور را درفواصلی برابر بافاصلهٔ واحد از مبدأ قطع می‌کند. در هرحال چون $c$ با $a$ برابر نیست بنابراین مقدار واقعی فاصلهٔ نقاط تقاطع از مبدأ یکی‌نیست (خطچین به‌مثال ۳-۷-۲ مربوط است).

**مثال ۳-۷-۲** دوصفحه با شاخصهای (۱۲۲) روی محورهای مختصات شکل ۳-۷-۵ رسم کنید.

حل: نقاط تقاطع عکس (۱۲۲) یعنی $1a$، $b$ ۵ر۰ و $c$۵ر۰ است، که باخطچین داخلی مشخص شده‌اند. صفحه‌ای با نقاط تقاطع $2a$، $1b$ و $1c$ موازی این صفحه است و بنابراین همان شاخصها را دارد (خط‌چین بیرونی). ▲

**مثال ۳-۷-۳** تعداداتمهای واقع برهرمیلی مترمربع از صفحات (۱۰۰) و (۱۱۱) سرب (fcc) چقدر است؟

حل: (از پیوست ب) $0.1750\ \text{nm}$ = شعاع Pb

$$a_{\text{Pb}}=\frac{4R}{\sqrt{2}}=\frac{2(0.1750\ \text{nm})}{1.414}=0.495\ \text{nm}$$

شکل ۳-۷-۶ نشان می‌دهد که صفحهٔ (۱۰۰) در هروجه سلول واحد، دواتم دارد

$$(100):\frac{\text{اتم}}{\text{mm}^2}\ \frac{\text{اتم } 2}{(0.495\times10^{-6}\text{mm})^2}=8.2\times10^{12}\ \text{اتم}/\text{mm}^2$$

شکل ۳-۷-۷ (ب) نشان می‌دهد کـه صفحهٔ (۱۱۱) حاوی سه‌تـا یك‌ششم اتم در سطح مثلثی تیره شده، است

**شکل ۳-۷-۶** غلظت اتمی (۱۰۰) در fcc. صفحهٔ (۱۰۰) در ساختار fcc درهر $a^2$، دواتم دارد.

(ب) (الف)

**شکل ۳-۷-۷** غلظت‌اتمی (۱۱۱) در fcc. صفحهٔ(۱۱۱) درهر $R^2\sqrt{3}$ دارای نیم اتم است.

$$(111):\left(\frac{\text{اتم}}{\text{nm}^2}\right)=\frac{\frac{3}{6}}{\left(\frac{1}{2}\right)bh}=\frac{\frac{3}{6}}{\left(\frac{1}{2}\right)(2)(0{,}1750\ \text{nm})(\sqrt{3})(0{,}1750\ \text{nm})}$$

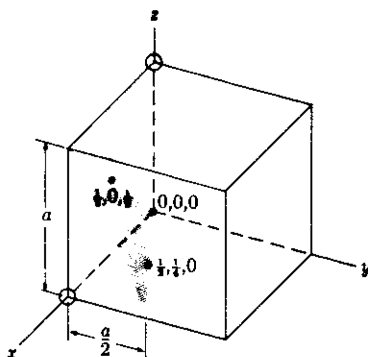
$$=9{,}4\ \text{اتم}/\text{nm}^2=9{,}4\times10^{12}\ \text{اتم}/\text{mm}^2$$ ▲

**مثال ۳-۷-۴** صفحه‌ای شامل مکانهای ۰، ۰، ۰ و ۲ر۱، ۴ر۱، ۰ و ۱/۲، ۰، ۱/۲ است. شاخصهای میلر آن چیست؟

حل: شکل بکشید (شکل ۳-۷-۸).

ازآنجا که صفحه ازمبدأ می‌گذرد، مبدأ را مثلا ۱ واحد درجهت $x$ حرکت دهید. حالا نقاط تقاطع $-1a$، $0{,}5a$ و $+1a$ خواهد بود؛ بنابراین $(\bar{1}21)$ به‌دست‌می‌آید.

توضیح. اگر مبدأ را یك واحد به‌طرف بـالا حرکت می‌دادیم، نقاط تقاطع ۱+، ۱/۲- و ۱- می‌شد که $(1\bar{2}\bar{1})$ به‌دست می‌آمد. این صفحه به‌موازات $(\bar{1}21)$ وبنابراین معادل آن است.
▲




**شکل ۳-۷-۸** صفحهٔ $(1\bar{2}\bar{1})$ (مثال ۳-۷-۴ را ببینید).

**مثال ۳-۷-۵** خطی که از تقاطع صفحات (۱۱۱) و (۱۱۲) به‌دست می‌آید دارای چه جهتی است؟

حل: به‌شکل ۳-۷-۴ مراجعه کنید: $[1\bar{1}0]$، (یا $[\bar{1}10]$).

توضیح. با بررسی شکل، خط تقاطع به‌صورت ساده‌تری به‌دست می‌آید ولی می‌توان آن را با ضرب برداری شاخصهای صفحات نیز به‌دست آورد. ▲

☐ **مثال ۳-۷-۶** با مراجعه به‌شکل ۳-۳-۱ (الف)، شاخصی برای صفحهٔ روبروی خواننده پیدا کنید.

حل:

| محور: | $a_1$ | $a_2$ | $a_3$ | $c$ |
|---|---|---|---|---|
| تقاطع: | ۱ | $\infty$ | $-1$ | $\infty$ |

بنابراین، شاخص $(hkil)$ آن $(10\bar{1}0)$ است، زیرا عکس این ارقام را به‌کار می‌بریم.

توضیح. اگر صورت دیگر آن، مثل شکل ۳-۳-۱ (ب)، را به‌کار می‌بردیم، شاخص $(hkl)$ آن (۱۰۰) می‌شد. شاخص اضافی، $i$، طبق رابطهٔ (۳-۷-۱) به $h$ و $k$ مربوط می‌شود. ▲

**مثال ۳-۷-۷** صفحات مجزایی را که به‌خانوادهٔ $\{111\}$ بلورهای مکعبی تعلق دارند ذکر کنید.

حل:

$(111)$ $(\bar{1}11)$ $(1\bar{1}1)$ $(11\bar{1})$

$(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ $(1\bar{1}\bar{1})$ $(\bar{1}1\bar{1})$ $(\bar{1}\bar{1}1)$

توضیح. درعمل (به‌جـای ۸) فقط ۴ مجموعهٔ صفحه وجـود دارد، زیرا صفحـات مجموعهٔدوم باصفحات مجموعهٔ اول موازی‌اند. ولی برخلاف جهات‌منفی (مثال ۳ـ۶ـ۲)، ما معمولاًصفحات افزونه را ذکرمی‌کنیم زیرا هشت صفحه (دراین مورد) حجمی‌راتشکیل می‌دهند و شکلی بلوری به‌وجود می‌آورند. شکل بلوری برای {۱۱۱}، دوهرم است. ▲

## □ ۳ـ۸ تفرق اشعهٔ ایکس

بررسیهای تجربی بسیار کامل ساختارهـای بلوری موردبحث، ازطریق تفرق اشعهٔ ایکس در دسترس ما قرار گرفته است. اگر امواج الکترومغناطیسی بسامد بالا، طـوری انتخاب شوند که دارای طـول موجی بزرگتر از فواصل بین‌صفحه‌ای بلورهـا باشند، این امواج طبق قوانین فیزیکی کاملا مشخصی تفرق می‌یابند. با استفاده از زوایای تفرق می‌توان بـا دقت زیاد ساختارهای بلوری را مشخص‌کرد. به‌همین‌ترتیب بـا استفاده ازآن مـی‌توان فواصل بین صفحه‌ای (وبنابراین شعاع‌اتمی) فلزات را تا چهار رقم بامعنی وحتی دقیقتر، محاسبه‌کرد. دراینجا ابتدا فواصل بین صفحات را بررسی می‌کنیم، سپس به‌موضوع تفرق می‌پردازیم.

**فواصل بین صفحه‌ای.** همان‌طورکـه دربخش ۳ـ۷ گفته شدصفحـات مـوازی دارای نشانهای $(hkl)$یکسان‌اند. بنابراین علاوه برصفحات‌متعدد (۱۱۰) شکل ۳ـ۷ـ۲، صفحهٔ دیگری نیز وجود دارد که مستقیماً از مبدأ مـی‌گذرد. درنتیجه اگر فاصلهٔ قائم بین صفحهٔ مبدأ و صفحهٔ (۱۱۰) مجاور اندازه گرفته شود فـاصلهٔ بین صفحه‌ای $d$ به‌دست مـی‌آید. دیده می‌شودکـه درساختارهای مکعبی ساده شکلهای ۳ـ۷ـ۱ (الف)، ۳ـ۷ـ۲ (الف) و ۳ـ۷ـ۳ (الف) فواصل بین صفحه‌ای $d_{010}$، $d_{110}$، $d_{111}$ به‌ترتیب برابرa، $a/\sqrt{2}$ و$a/\sqrt{3}$ است‌یعنی برای $d_{010}$ در هروجه، $a$، یك فاصله؛ برای $d_{110}$ درهرقطر وجه، $a\sqrt{2}$، دوفـاصله و برای $d_{111}$ درهرقطر مکعب، $a\sqrt{3}$، سه‌فاصلهٔ بین صفحه‌ای مـوجود است. فواصل بین صفحه‌ای $d$ در بلورهای مکعبی را مـی‌توان به‌صورت قاعدهٔ کلی زیر فرمولبندی کرد

$$d_{hkl}=\frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \qquad (۳\text{ـ}۸\text{ـ}۱)$$

کـه درآن $a$ ثابت شبکه‌ای و $h$، $k$ و $l$ شاخصهـای صفحات‌اند.* فـواصل بین صفحه‌ای

* معکوس‌بودن شاخصهای میلر، چنین محاسبات ساده‌شده‌ای را ممکن می‌سازد. همچنین ضرب برداری شاخصهای میلر برای دوصفحهٔ متقاطع، امتداد خط تقاطع آنها را به‌دست می‌دهد. در نهایت شرط قرارگرفتن هرامتداد در صفحه، این است که حاصل‌ضرب حسابی شاخصهای آن در شاخصهای صفحه‌برابر صفر باشد. به‌طورخلاصه، دلایلی وجود دارد که استفاده ازطریقهٔمعکوس کردن اعداد در شاخصهای میلر را توجیه می‌کند.

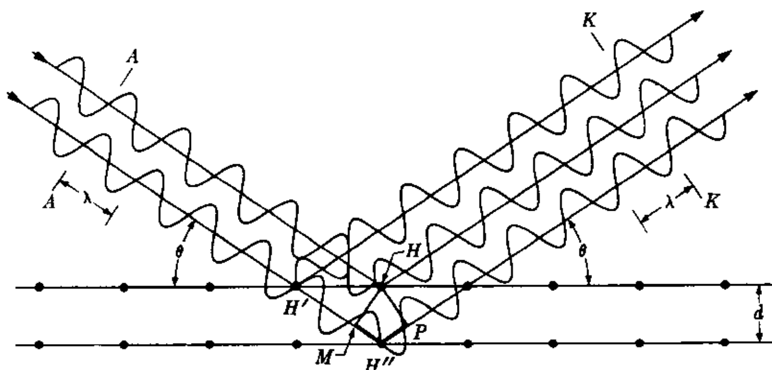
بلورهای غیرمکعبی را نیز می‌توان با روابطی که به رابطهٔ ۳ـ۸ـ۱ مربوط می‌شوند نشان داد، ولی برای این منظور باید متغیرهای جدول ۳ـ۱ـ۱ را نیز درنظر گرفت.

**قانون براگ.** وقتی اشعهٔ ایکس به‌مادهٔ بلوری برخورد کند صفحات اتمی (یایونی) داخل بلور باعث تفرق آن خواهد شد. زاویهٔ تفرق، $\theta$، به‌طول‌موج اشعهٔ ایکس، $\lambda$، و فاصلهٔ بین صفحات، $d$، بستگی دارد

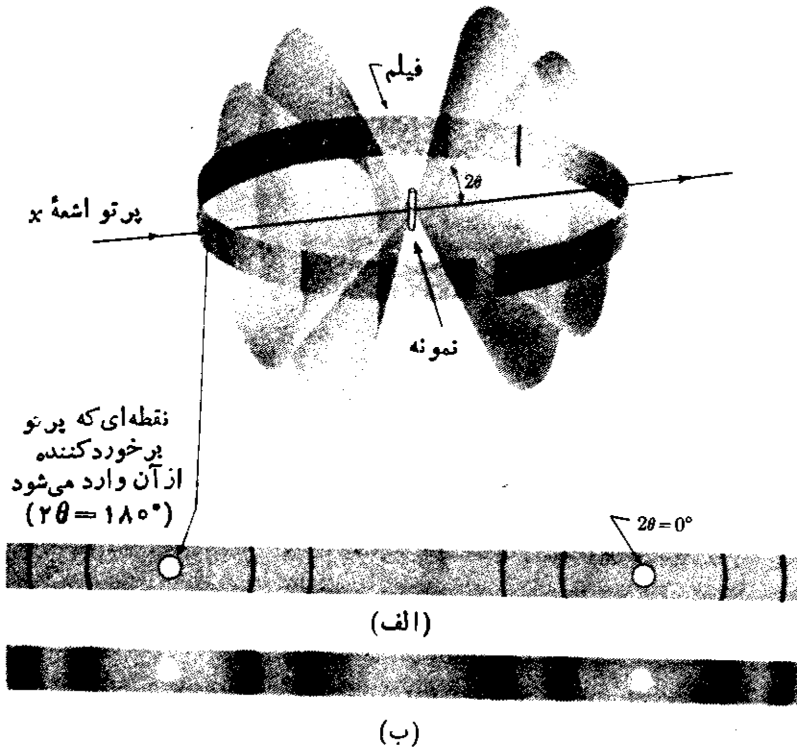
$$n\lambda = 2d \sin\theta \qquad (۳\text{–}۸\text{–}۲)$$

صفحات اتمی موازی شکل ۳ـ۸ـ۱ را که باعث تفرق موج شده است درنظر بگیرید. امواج ممکن است از اتمهای واقع در $H$ و $H'$ منعکس شوند و در $K$ همفاز باقی بمانند. درهرصورت اشعهٔ ایکس نه‌تنها ازصفحهٔ سطحی بلکه از زیر صفحات مجاور نیز منعکس می‌شود. برای اینکه این بازتابها همفاز باقی بمانند و همدمی باشند فاصلهٔ $MH''P$ باید مساوی بامضرب صحیحی ازطول موج باشد. مقدار $n$ در رابطهٔ (۳ـ۸ـ۲) تعداد صحیح شعاعهایی است که درفاصلهٔ $MH''P$ وجود دارد.

**تحلیل تفرق.** متداولترین روش تحلیل تفرق اشعهٔ ایکس، استفاده ازگرد بسیار ریز مادهٔ موردنظر است. این گرد را با سیمان پلاستیکی می‌آمیزند و رشتهٔ بسیار نازکی می‌سازند و آن را در مرکز دوربین مدوری (شکل ۳ـ۸ـ۲) قرار می‌دهند. دسته‌ای اشعهٔ‌ایکس به گرد تابانده می‌شود. چون تعداد بسیار زیادی از ذرات گرد که کلیهٔ جهات ممکن را دارند تحت تابش قرار می‌گیرند، بنابراین اشعهٔ تفرق یافته به‌صورت پرتوهای مخروطی با زاویهٔ $2\theta$ از اشعهٔ اولیه حاصل می‌شود. (طبق شکل ۳ـ۸ـ۱ پرتو تفرق یافته نسبت به‌پرتو اولیه با زاویه‌ای برابر $2\theta$ منحرف شده است.)




**شکل ۳ـ۸ـ۱** تفرق اشعهٔ ایکس.




**شکل ۳ـ۸ـ۲** اثر تفرق اشعهٔ ایکس روی فیلم عکاسی. زاویهٔ $\theta$ ۲ دقیقاً براساس فاصلهٔ صفحات اتمی، $d$، و طول موج $\lambda$ طبق رابطهٔ (۳ـ۸ـ۲) تعیین می‌شود. هریك از مخروطهای انعکاسی، در دومحل روی حلقهٔ فیلم ثبت می‌شود.

مخروط تفرق‌یافته در دومحل روی فیلم داخل دوربین اثر می‌گذارد؛ کـه هرکدام نسبت به‌خطی که دوسوراخ را به‌هم وصل می‌کند زاویه مـرکزی $\theta$ ۲ می‌سازد. برای هر مقدار $d_{hkl}$ فاصلهٔ بین صفحه‌ای مخروط (یا یك‌جفت خط تفرق) جداگانه‌ای وجود دارد. بنابراین خطوط تفرق را می‌توان تعیین کرد و بـا استفاده از رابطهٔ (۳ـ۸ـ۲) فاصلهٔ بین صفحه‌ای‌را حساب کرد. کلیهٔ‌فلزات fcc مجموعهٔ خطوط تفرق‌مشابهی دارند ولی‌مقدار $2\theta$ در آنها متفاوت است، زیرا ثابت شبکـه‌ای متفاوتی دارند. مثلا $a_{Cu} = ۰٫۳۶۱۵$ nm، $a_{Al} = ۰٫۴۰۴۹$ nm، $a_{Pb} = ۰٫۴۹۵$ nm. بنابـراین می‌توان فلزات مختلف fcc را ازهم تشخیص داد.

درشکل ۳ـ۸ـ۳ فیلمهای تفرق اشعهٔ ایـکس مس (fcc)، تنگستن (bcc) و روی (hcp) را مشاهده می‌کنیم. بلافاصله مشخص می‌شود که ترتیب خطوط تفرق در این سه




(الف) fcc



(ب) bcc



(ج) hcp

**شکل ۳-۸-۳** تفرق اشعهٔ ایکس برای الف) مس fcc؛ ب) تنگستن bcc؛ و ج) روی hcp. ساختار بلوری و ثابتهای شبکه را می‌توان با استفاده از چنین الگوهایی محاسبه کرد.

نوع بلور متفاوت است. چون بررسی این اختلافات در اینجا ممکن نیست باید به‌سادگی گفت که با داشتن «اثر انگشت»های متفاوت نه‌تنها می‌توان اندازهٔ ثابتهای شبکه‌ای را با بیشینهٔ دقت تعیین کرد بلکه شبکهٔ بلوری را نیز می‌توان تشخیص داد. تفرق اشعهٔ ایکس وسیلهٔ پرقدرتی درمطالعهٔ ساختار داخلی مواد است.

**مثال ۳-۸-۱** اشعهٔ ایکس باطول موج نامعلوم به‌وسیلهٔ مس (fcc) با ثابت شبکه‌ای $a = ۰٫۳۶۱۵\ \text{nm}$ به‌اندازهٔ $۴۳٫۴^\circ$ متفرق می‌شود. آزمایشات دیگری نشان داده است که این‌خط تفرق برای مس از خطوط درجهٔ‌اول $(n = ۱)$ و برای $d_{۱۱۱}$ است. الف) طول موج اشعهٔ‌ایکس‌چقدر است؟ ب)همین اشعه را برای تحلیل تنگستن (bcc) به‌کار برده‌اند. در فواصل صفحه‌ای $d_{۱۱۰}$ زاویهٔ $۲\theta$ را برای خطوط تفرق درجهٔ دوم $(n = ۲)$ پیدا کنید.

حل: الف) از آنجا که $۲\theta = ۴۳٫۴^\circ$؛ با استفاده از روابط (۳-۸-۱)و(۳-۸-۲) داریم

$$(1)\lambda = 2\left[\frac{0.3615\ \text{nn}}{\sqrt{1^2+1^2+1^2}}\right]\sin 21.7^\circ$$

$$= 0.1542\ \text{nm}$$

ب) از پیوست (ب)

$$R_w = 0.1367\ \text{nm}$$

از رابطهٔ (۳-۲-۱)

$$a_w = 4(0.1367\ \text{nm})/\sqrt{3} = 0.3157\ \text{nm}$$

از روابط (۳-۸-۱) و (۳-۸-۲)

$$\sin\theta = \frac{2(0.154\ \text{nm})(\sqrt{0+1+0})}{(2)(0.3157\ \text{nm})}$$

$$2\theta = 58.4^\circ$$

توضیح. تفرق‌درجهٔ دوم $d_{010}$ معادل‌است باتفرق درجهٔ یك $d_{020}$ یعنی فاصلهٔ‌عمودی مبدأ تا صفحه‌ای کـه محورهای $x$، $y$ و $z$ را به‌ترتیب در $\infty$، ۱/۲ و $\infty$ قطع می‌کند. صحت این را می‌توان با استفاده از روابط (۳-۸-۱) و (۳-۸-۲) ثابت‌کرد.

فواصل بین صفحهٔ ($d_{hkl}$) کلیهٔ صفحات هم‌شکل برابر است؛ مثلا درسیستم مکعبی $d_{100} = d_{010} = d_{001}$ است. ▲

## مرور و بررسی مطالب

در فصل ۲ پیوند بین هراتم و اتمهای همسایه و نیز کـﯼ‌ئوردیناسیون حاصل بررسی شد. در این فصل با بررسی نظم هندسی پردامنه‌تر قدم دیگری برای درك ساختار داخلی مواد برداشته‌شد. چون کلیهٔ اتمهای‌همسان کوئوردیناسیون مشابهی دارند بنابراین تکرارمتوالی یك‌الگو درماده قابل انتظار است.

### خلاصه

جامدات بلوری را می‌توان به‌سلولهـای واحدی تقسیم‌کرد کـه هرکدام تمام خـواص کوئوردیناسیون اتمی موجود درکل بلور را دارنـد. مکانهای معادل در هـرسلول واحد همسایه‌های یکسان درجهات یکسان و در فـواصل یکسان دارند. هنگام بررسی خواص

مواد این مطلب بررسی ساختار داخلی‌مواد را آسان می‌کند زیرا فقط باید سلول واحد را بررسی کنیم.

براساس‌شکل فضایی‌سلول واحد (ابعاد و زوایای محورهای سلول‌واحد) هفت‌سیستم بلوری وجود دارد. این هفت سیستم براساس آرایش داخلی مکانهای معادل درسلول واحد دارای شبکه‌هــای متعددی هستند. در این فصل بیشتر به‌ساختار مکعبی مــرکزدار (bcc)، مکعبی بــا وجوه مرکزدار (fcc) و ساختار عمومی شبکهٔ منشور شش بــرموسوم به‌منشور شش برفشرده (hcp) توجه‌شده‌است. درهنگام لزوم‌شبکه‌های راست وجهی‌مرکزدار (bct) ومکعبی ساده (sc) نیز بررسی شده‌اند.هرنقطهٔ درون شبکهٔ مکعبی مرکزدار ازمکان معادل خود با انتقال ۱/۲±، ۱/۲±، ۱/۲± جدا می‌شود. هرنقطهٔ درون شبکهٔ مکعبی بــا وجوه مــرکزدار از سه مکان معادل دیگر خود بــا انتقالهــای ۱/۲±، ۱/۲±، ۰؛ ۱/۲±، ۰، ۱/۲±؛و ۰، ۱/۲±، ۱/۲±، جدا می‌شود.نقاط درون شبکهٔ ساده در داخل آن سلول واحد تکرار نمی‌شوند.

جهات بلوری براساس ابعاد سلول واحــد شاخص‌گذاری می‌شوند. بنابراین جهت [۱۱۱] خطی است که بدون توجه به‌سیستم بلوری، مبدأ ۰، ۰، ۰ را به‌مرکز سلول واحد متصل می‌کند و ازگوشهٔ دیگرمی گذرد. کلیهٔ جهات هم‌خــانوادهٔ $\langle hkl \rangle$ شامل کلیه جهات مشابه است، به استثنای موقعی‌که محورهــای مختصات به‌طور اختیاری به‌صورت دیگری انتخاب شوند.

صفحات بلوری با عکس مختصات محل تقاطع صفحه با محور (پس ازحذف کسرها وتبدیل‌آنها به‌عدد صحیح) شاخص‌گذاری می‌شوند. ما بیشتر به‌صفحات (۱۰۰)، (۱۱۰) و (۱۱۱) توجه می‌کنیم بنابراین خواننده باید با مطالب زیرآشنایی‌کافی پیدا کند:

۱. هرصفحه‌ای‌که ازخانوادهٔ {۱۰۰} باشد بــا دومحور مختصات موازی است و محور سوم را قطع می‌کند؛

۲. هرصفحه‌ای‌که ازخانوادهٔ {۱۱۰} باشد بــا یك محور موازی است و دومحور دیگر را درمختصات مساوی قطع می‌کند؛ و

۳. صفحاتی‌که ازخانوادهٔ {۱۱۱} باشند هــرسه محور را درنقطه‌ای بــا مختصات مساوی قطع می‌کنند.

چون این‌کتابی بــرای درس بلورشناسی نیست درمورد چگونگی به‌وجودآمــدن ساختارهای بلوری و تشخیص‌آنها درآزمایشگاه بحث‌زیادی نکردیم، ولی متذکرشدیم که دربررسی شبکهٔ بلوری از تفرق اشعهٔ ایکس استفاده می‌شود. زوایای تفرق به‌وسیلهٔ قانون براگ تحلیل می‌شوند. تعداد اندکی از مشخصات ساختاری نیز وجود داردکــه آنها را می‌توان با اطمینان بیشتری از این پارامترهای بلوری، اندازه‌گیری کرد.

## سؤالات تشریحی

۱. منظور ازنظم‌بردامنه چیست؟

۲. زمینی پوشیده ازکاشی را درنظر بگیرید، به‌طور تصادفی نقطه‌ای روی آن انتخاب کنید، توضیح دهیدکه منظور از «فاصلهٔ تکرارشونده» چیست؟
۳. سیستمهای بلوری مختلف را نام ببرید و مشخصات متمایزکنندهٔ هریك را ذکرکنید.
۴. گوشهٔ سلول واحد مکعبی با چند سلول واحد مشترك است؟ گوشهٔ سطح مستطیل‌شکلی از یك‌صفحهٔ به‌چند «سطح واحد» تعلق دارد؟
۵. به‌کمك شکل ۳ـ۲ـ۴ ، نشان دهیدکه برای fcc، $CN = ۱۲$ است.
۶. کاغذ دیواریی با اشکال پیچیده را درنظر بگیرید و نقطه‌ای تصادفی روی‌آن انتخاب کنید. سه‌مکان معادل پیدا کنید. فواصل انتقالی بین مکانهای معادل چقدر است؟
۷. برای الگوهای دوبعدی پنج سطح واحد مختلف‌وجود دارد: مربع‌ساده، مستطیل‌ساده، مستطیل‌با اضلاع مرکزدار، متوازی‌الاضلاع و شش‌بر. هرکدام‌چندمکان معادل دارند؟ چرا مربع با اضلاع مرکزدار ذکر نشد؟ مستطیل با اضلاع مرکزدار گاهی‌لوزی ساده نامیده می‌شود. دراین باره شرح دهید.
۸. شبکهٔ fcc را می‌توان به‌صورت شبکهٔ لوزوجهی نیز نشان داد. الف) دوشبکه چگونه باهم مقایسه می‌شوند؟ ب) زاویهٔ رأس‌آن چقدر است؟ ج) نسبت حجمهای سلولهای واحد چقدر است؟ ☐ د) چرا fcc را به‌لوزوجهی ترجیح داده‌ایم؟
۹. درمیان شبکه‌های سه‌بعدی، bcc و bct (یعنی‌راست‌وجهی مرکزدار) و نیز fcc را شرح دادیم ولی از fct صحبتی به‌میان نیامد. علت آن را شرح دهید.
۱۰. نسبت حجم دونـوع سلول واحـد شش‌بـر شکل ۳ـ۳ـ۱ چقدر است؟ نسبت تعداد مکانهای معادل آنها چقدر است؟
۱۱. ابعاد و«شکل» حفره‌هایی‌راکه‌مراکز آنها درمکانهای ۱/۲، ۱/۲، ۰و۱/۲، ۱/۴، ۰، فلز bcc قراردارند مقایسه‌کنید.
۱۲. ابعاد و «شکل» حفره هـایی را کـه مراکز آنها در مکانهای ۱/۲، ۰، ۰ و ۱/۴، ۱/۴، ۱/۴ فلز fcc قـرار دارند مقایسه‌کنید.
۱۳. الماس درمقایسه باگرافیت برای پایداربودن به‌فشار بیشتری احتیاج دارد. این‌مطلب چه‌چیزی را درمورد چگالی الماس وگرافیت نشان می‌دهد؟
۱۴. کبالت درحین گرم شدن در $۱۱۲۰°C$ از hcp به fcc تبدیل می‌شود. تغییرحجم آن الف) درمقایسه با آهن چگونه است، آهن درحین گرم‌شدن منقبض‌می‌شود و ازشکل مربوط به‌دمای پایین به‌شکل مربوط به‌دمای بـالا تبدیل می‌شود (مثال ۳ـ۴ـ۱)؛ و ب) در مقایسه بـا تیتانیم چگونه است، تیتانیم درحین سرد شدن منقبض شده ازشکل مربوط به‌دمای بـالا به‌شکل مربوط به‌دمای پایین تبدیل می‌شود (مسئلهٔ ۳ـ۴ـ۳).
۱۵. شکل ۳ـ۲ـ۴ نشان می‌دهد که‌آهن fcc را می‌توان راست‌وجهی مرکزداری (bct) با $c/a = ۱٫۴۱۴$ نامید. چرا به‌جای bct از fcc استفاده می‌شود؟

۱۶. قلع‌خاکستری‌ساختار الماس (شکل ۲ـ۲ـ۴) را دارد. قلع‌سفید ساختار راست‌وجهی مرکزداری داردکه درآن اتمهای قلع درنقاط زیرقرار دارند

$$0,0,0 \qquad \frac{1}{2},\frac{1}{2},\frac{1}{2} \qquad \frac{1}{2},0,\frac{1}{4} \qquad 0,\frac{1}{2},\frac{3}{4}$$

سلول واحدآن را رسم‌کنید. نشان دهیدکه مکانهای دوم و سوم پیشگفته معادل نیستند ولی مکانهای دوم و چهارم معادل‌اند.

۱۷. چند جهت درخانوادهٔ ⟨۰۱۲⟩ سیستم‌بلوری مکعبی‌وجود دارد؟ (معمولا جهات $[uvw]$ و $[\bar{u}\bar{v}\bar{w}]$ را یکی درنظرمی گیریم، زیرا منفی‌کردن هرسه‌شاخص همان خط را ولی درجهت عکس نشان می‌دهد. یعنی $[uvw] - = [\bar{u}\bar{v}\bar{w}]$).

☐ ۱۸. سؤال۱۷ را برای بلور راست‌وجهی تکرار کنید (به‌یاد داشته باشیدکه درراست‌وجهی $a \neq c$. بنابراین دراین مورد برخلاف سیستم مکعبی نمی‌توانیم ۲ را به‌صفر یا یك تبدیل‌کنیم).

۱۹. سلول واحد hcp شکل ۳ـ۳ـ۲ (ب) را می‌تـوان به‌صورت شبکهٔ لوزی‌شکل نیز کشید. [به‌شکل ۳ـ۳ـ۱ (ب) رجوع‌کنید.] در هرسلول واحد چندمکان معادل وجود دارد؟ (آیا مکانهایی‌که انتخاب کرده‌ایـد همسایه‌های یکسانی درجهات یکسان و در فاصلهٔ یکسان دارند؟ اگرندارند مکانهای معادل‌نیستند. مسئلهٔ ۳ـ۵ـ۱۰ را حل‌کنید.)

۲۰. کدامیك ازجهات زیر درصفحهٔ (۱۱۰) قرار دارد؟

[۱۱$\bar{۲}$] [۱$\bar{۱}$۰] [۰۰۱] [۱$\bar{۱}$۲] [۸$\bar{۸}$۹]

☐ ۲۱. نشان دهیدکه حاصلضرب عددی $[uvw]$ و $(hkl)$، درصورتی که جهت مذکور روی صفحه قرار گرفته باشد، صفراست.

☐ ۲۲. جهت [۱۱۱] بـرصفحهٔ (۱۱۱) بلور مکعبی عمود است، ولی در بلور راست‌وجهی عمود نیست. چرا؟

☐ ۲۳. با استفاده ازشکل ۳ـ۷ـ۲ (ج) ثابت‌کنیدکه تفرق درجهٔ دوم $(n = 2)$ برای $d_{110}$ برابراست با تفرق درجهٔ یك $(n = 1)$ برای $d_{220}$.

۲۴. فشردگی اتمی در فلزات بـه انـدازهٔ اتم بستگی ندارد. تحت چه شرایطی ضریب فشردگی برای ماسهٔ موجود دریك مخزن به اندازهٔ دانه‌های ماسه بستگی ندارد؟

۲۵. همان‌طورکه دربخش ۳ـ۱ ذکرشده، بخش عمده‌ای از فلزات مکعبی‌اند؛ ولی تعداد کمی ازجامدات مولکولی ساختار مکعبی دارند. دلیل‌آن را شرح دهید.

☐ ۲۶. (۰۲۰) را مشابه بـا (۰۱۰) درنظر گـرفتیم؛ ولی بین $d_{020}$ و $d_{010}$ تفاوت قـائل شدیم. چرا؟

## مسائل

۳-۱-۱ سلول واحد آلومینیم مکعبی با $a = 0.4049$ nm است. با استفاده ازچگالی آن محاسبه کنید که چند اتم درهرسلول واحد وجود دارد.

جواب: ۴

۳-۱-۲ درهرسلول واحد روی دواتم وجود دارد، حجم سلول واحدآن چقدر است؟

**۳-۱-۳** قلع راست‌وجهی با $c/a = 0.546$ است. درهرسلول واحد آن ۴ اتم وجود دارد. الف) حجم سلول واحد چقدر است؟ ب) ابعاد شبکه چقدر است؟

جواب: الف) $c = 0.318$ nm، ب) $a = 0.582$ nm

**۳-۱-۴** صفحهٔ نازکی از طلا دارای ضخامت $0.08$ mm و سطح $670\ mm^2$ است. الف) طلا ساختاری مکعبی با $a = 0.4076$ nm دارد. در این‌صفحه چند سلول واحد وجود دارد؟ ب) اگر چگالی برابر $19.32\ Mg/m^3$ $(= 19.32\ g/cm^3)$ باشد، جرم هرسلول واحد چقدر است؟

۳-۲-۱ ضریب فشردگی اتمی فلز bcc را محاسبه کنید.

جواب: $0.68$

۳-۲-۲ حجم سلول واحدکرم درمثال۳-۱-۱ برابر، $24 \times 10^{-30}$ یا، $0.024\ nm^3$ است. براساس داده‌هایی‌که درآن مسئله به‌کاررفته، به‌علاوهٔ $PF_{bcc\text{فلز}} = 0.68$، شعاع اتم کرم را محاسبه و با مقدار ذکرشده درپیوست (ب) مقایسه کنید.

۳-۲-۳ نقره fcc و شعاع اتمی‌آن $0.1444$ nm است. طول ضلع سلول واحد آن چقدر است؟

جواب: $0.4084$ nm

۳-۲-۴ نیکل fcc است و چگالی‌آن $8.9\ Mg/m^3$ $(= 8.9\ g/cm^3)$ است. الف) حجم هرسلول واحد براساس چگالی چقدر است؟ ب) ازجواب قسمت (الف)، شعاع اتم نیکل را محاسبه کنید. این مقدار را با مقدار ذکرشده درپیوست (ب) مقایسه کنید.

۳-۲-۵ تیتانیم در دمای بالا، bcc و شعاع اتمی‌آن $0.145$ nm است. الف) ضلع سلول واحد چقدر است؟ ب) چگالی را محاسبه کنید.

جواب: الف) $0.335$ nm، ب) $4.24\ Mg/m^3$ $(= 4.24\ g/cm^3)$

۳-۲-۶ سرب fcc است و شعاع اتمی‌آن $1.750 \times 10^{-10}$ m است. حجم‌سلول‌واحد آن چقدر است؟

۳-۲-۷ چگالی تنگستن را ازسایر داده‌های پیوست (ب) به‌دست آورید.

جواب: $۱۹٫۲۱ \text{ Mg/m}^۳$ ($= ۱۹٫۲۱ \text{ g/cm}^۳$)

۳-۲-۸ ساختار باریم، با چگالی $۳٫۶ \text{ Mg/m}^۳$ ($= ۳٫۶ \text{ g/cm}^۳$)، bcc است. الف) فاصلهٔ بین مراکز نزدیکترین اتمها را محاسبه کنید؛ ب) اندازهٔ ضلع سلول واحد چقدر است؟ (عدد اتمی آن ۵۶ و وزن اتمی آن ۱۳۷٫۳amu است.)

۳-۲-۹ اکسیدمنیزیم (MgO) همان ساختار NaCl (شکل ۳-۱-۱) را دارد. الف) ثابت شبکهٔ، $a$، آن چقدر است؟ ب) چگالی آن چقدر است؟ (یادداشت: MgO ترکیبی یونی است؛ بنابراین باید به‌جای شعاع اتمی ازشعاع یونی استفاده کنیم.)

جواب: $۳٫۸ \text{ Mg/m}^۳$ ($= ۳٫۸ \text{ g/cm}^۳$)

۳-۲-۱۰ چگالی NaCl را حساب کنید.

۳-۲-۱۱ با مراجعه به‌شکل ۳-۱-۱ حساب کنید الف) فاصلهٔ بین مراکز نزدیکترین یونهای $Cl^-$ چقدر است؟ ب) فاصلهٔ بین‌مرکز یون $Na^+$ تا نزدیکترین یون $Cl^-$ بعدی چقدراست؟ ج) فاصلهٔ بین‌سطوح نزدیکترین‌یونهای $Cl^-$ چقدر است؟ نزدیکترین‌یونهای $Na^+$ چطور؟

جواب: الف) ۰٫۳۹ nm، ب) ۰٫۲۸nm، ج) ۰٫۰۳ nm، ۰٫۲ nm

۳-۲-۱۲ رابطهٔ بین‌شعاعهای اتمی (یا یونی) و ابعاد سلول‌واحد را برای‌مکعب مرکزدار و مکعب با وجوه مرکزدار درجدولی ذکر کنید.

| | bcc فلز | fcc فلز | $fcc_{NaCl}$ |
|---|---|---|---|
| ضلع سلول واحد | $a = ۴R/\sqrt{۳}$ | | |
| قطر وجوه جانبی | | | |
| قطر مکعب | | | |

۳-۲-۱۳ الف) درهر $mm^۳$ استرونسیم جامد چند اتم وجود دارد؟ ب) ضریب‌فشردگی اتمی‌آن چقدر است؟ ج) این‌ماده مکعبی‌است. شبکهٔ فضایی آن چیست؟ (عدد اتمی = ۳۸؛ جرم‌اتمی = ۸۷٫۶۲ amu؛ شعاع‌اتمی = ۰٫۲۱۵ nm؛ شعاع یونی = ۰٫۱۲۷ nm؛ چگالی = $۲٫۶ \text{ Mg/m}^۳$.)

جواب: الف) $۱٫۷۸ \times ۱۰^{۱۹}/\text{mm}^۳$، ب) ۰٫۷۴

**۳-۲-۱۴** الف) درهر $mm^3$ تانتال جامد چند اتم وجود دارد؟ ب) ضریب‌فشردگی‌اتمی آن چقدر است؟ ج) این ماده مکعبی است، شبکهٔ فضایی آن چیست؟ (عدد اتمی = ۷۳؛ جرم‌اتمی = ۱۸۰٫۹۵ amu؛ شعاع‌اتمی = ۰٫۱۴۲۹ nm؛ شعاع‌یونی = ۰٫۰۶۸nm؛ چگالی = ۱۶٫۶ $Mg/m^3$).

**۳-۳-۱** ازداده‌های پیوست (ب) برای‌کبالت (hcp)، حجم‌سلول‌واحد(شکل۳-۳-۲) را محاسبه‌کنید.

جواب: ۰٫۰۶۶ $nm^3$

**۳-۳-۲** اسمیم بـا شعاع متوسط ۰٫۱۳۷nm، hcp است حجم سلول واحـد آن را محاسبه‌کنید.

**۳-۳-۳** جرم‌اتمی زیرکونیم ۹۱٫۲۲ amu است، و شعاع متوسط اتمی این‌فلز hcp، ۰٫۱۶ nm است. الف) حجم مربوط به هـراتم (کره+فضای بین اتمی) چقدر است؟ ب) از جواب قسمت (الف) چگالی را محاسبه‌کنید.

جواب: الف) $۲۳٫۲ \times ۱۰^{-۳۰}$ $m^3$ (یا ۰٫۰۲۳۲ $nm^3$)
ب) ۶٫۵ $Mg/m^3$ (=۶٫۵ $g/cm^3$)

**۳-۳-۴** ساختار روی hcp است. ارتفاع سلول واحدآن ۰٫۴۹۴nm است. مراکـز اتمها در واحد شبکه‌ای به‌اندازهٔ ۰٫۲۶۶۵ nm ازهم فاصله دارند. الف) تعداد اتمهای موجود درسلول واحد منشور شش‌بر چقدر است؟ (برای آن دلیلی ذکرکنید.) ب) حجم سلول واحـد منشور شش‌بـر چقدر است؟ ج) چـگالی محـاسبه شده از چـگالی واقعی ۷٫۱۳۵ $Mg/m^3$، بزرگتراست یا کوچکتر؟

**۳-۳-۵** بـا استفاده از داده‌هـای مسئلهٔ ۳-۳-۴ (الف) نسبت $c/a$ روی چقدر است؟ □ ب) دوفاصله از فواصل بین اتمی اتمهای مجاور را محاسبه‌کنید.

جواب: الف) ۱٫۸۵ ب) ۰٫۲۶۶۵ nm، ۰٫۲۹۱ nm

**۳-۳-۶** منیزیم hcp است و اتمهایی تقریباً کروی به شعاع ۰٫۱۶۱ nm دارد. نسبت $c/a$ آن ۱٫۶۲ است الف) حجم‌سلول‌واحد را از این‌داده‌ها به‌دست‌آورید. ب) جواب خود را با استفاده ازآن درمحاسبهٔ چگالی منیزیم امتحان‌کنید.

**۳-۴-۱** ثـابت شبکهٔ الماس، $a$، شکل ۳-۲-۲ (ب) برابر ۰٫۳۵۷nm است. اگـر به گرافیت ($\rho =$ ۲٫۲۵ $Mg/m^3$ یا ۲٫۲۵ $g/cm^3$) تبدیل‌شود، چند درصد تغییرحجم خواهد داشت؟

جواب: ۵۶ v/o انبساط

۳-۴-۲ حجم سلول واحد آهن bcc در ۹۱۲°C برابر $nm^3$ ۰٫۰۲۴۶۴ است. حجم سلول واحد آهن fcc درهمان دما $nm^3$ ۰٫۰۴۸۶ است، درصد تغییر چگالی پس از تبدیل آن از bcc به fcc چقدر است؟

۳-۴-۳ تیتانیم در دمای بالا به‌صورت bcc است. هنگام تبدیل این ساختار به hcp درحین سرد شدن، شعاع آن ۲٪ افزایش می‌یابد. درصد تغییر حجم آن چقدر است؟ (یادآوری می‌شود که ضریب فشردگی اتمی نیز تغییر خواهد کرد.)

جواب: (۰٫۸ l/o − =) ۲٫۵ v/o −

۳-۴-۴ قلع فلزی دارای ساختاری راست‌وجهی با $a =$ ۰٫۵۸۲۰ nm و $c =$ ۰٫۳۱۷۵ nm است که درهرسلول‌واحد، چهاراتم‌دارد. صورت‌دیگر قلع (خاکستری) ساختار مکعبی الماس را دارد. [شکل ۲-۲-۴ (ب)] و $a =$ ۰٫۶۴۹ nm است. تغییر حجم قلع پس از تبدیل از خاکستری به‌فلزی چقدر است؟

۳-۴-۵ لایه‌های کربن در گرافیت (شکل ۲-۲-۶) ۰٫۳۳۴۸ nm از یکدیگر فاصله‌دارند. کوتاهترین فاصلهٔ بین مراکز اتمهای کربن ۰٫۱۴۲ nm است. الف) چگالی گرافیت از چگالی الماس بیشتر است یا کمتر [شکل ۲-۲-۴ (ب)]؟ ب) چند درصد؟ (۰٫۳۵۷ nm = $a_{\text{الماس}}$) (راهنمایی: تصویر روبروی یك‌لایه از گرافیت را بکشید و یك واحد سطح از آن را درنظر بگیرید.)

جواب: الف) ($\rho_{gr} =$ ۲٫۲۵ $Mg/m^3$ (یا ۲٫۲۵ $g/cm^3$ ب) ۶۴٪ الماس

۳-۵-۱ با مراجعه به‌شکل ۳-۲-۱ می‌توانیم‌ساختار یك‌فلز bcc را تنها با دومکان‌معین کنیم. این دومکان کدام‌اند؟

جواب: ۰، ۰، ۰ و ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲. (اتمهای باقیمانده نقشی در انتقال ندارند)

۳-۵-۲ با مراجعه به‌شکل ۳-۲-۳ می‌توانیم ساختار یك فلز fcc را با چهارمکان معین کنیم. این مکانها کدام‌اند؟

۳-۵-۳ مس fcc است و ثابت شبکهٔ آن ۰٫۳۶۱۵ nm است، فاصلهٔ بین مکانهای ۱، ۰، ۰ و ۱/۲، ۱/۲، ۰ چقدر است؟

جواب: ۰٫۴۴۲۷ nm

۳-۵-۴ MgO همان ساختار NaCl را دارد (شکل ۳-۱-۱). ثابت شبکهٔ آن ~ ۰٫۴۲ nm است. فاصلهٔ یون $Mg^{2+}$ در ۰، ۰، ۱/۲ و الف) نزدیکترین همسایه $Mg^{2+}$ آن؛ و ب) دومین همسایهٔ $Mg^{2+}$ نزدیك به‌آن چقدر است؟

۳-۵-۵ اگر اتم مسی درمبدأ سلول واحد fcc وحفرهٔ بین اتمی کوچکی در ۱/۴، ۱/۴، ۱/۴ وجود داشته باشد، سایر حفره‌های معادل کجایند؟

جواب: ۳/۴، ۳/۴، ۱/۴ ۳/۴، ۱/۴، ۳/۴ ۱/۴، ۳/۴، ۳/۴، درصورتی که ۱/۴، ۱/۴، ۱/۴ را نیز به‌حساب آوریم کلا چهارمکان در هرسلول واحد.

۳-۵-٦ مسئلهٔ ۳-۵-۵ را برای ۳/۴، ۳/۴، ۳/۴ به‌جای ۱/۴، ۱/۴، ۱/۴ تکرار کنید.

**۳-۵-۷** هر اتم در آهن bcc هشت همسایهٔ نزدیک دارد. الف) تعداد دومین اتمهای نزدیک به آن چندتاست؟ ب) اگر $a_{bcc}$ برای آهن ۰٫۲۸۶ nm باشد، فاصلهٔ آن تا دومین اتمهای نزدیک به آن چقدر است؟

جواب: الف) ۶ ب) ۰٫۲۸۶ nm

**۳-۵-۸** با مراجعه به‌مسئلهٔ ۳-۵-۵ وشکل ۳-۲-۳ دیده می‌شود که مکانهای ۱/۴، ۱/۴، ۱/۴ و ۳/۴، ۳/۴، ۳/۴ هردو بین چهار همسایهٔ مجاور قرار دارند. آیا این مکانها معادل‌اند؟ به‌عبارت دیگر، چرا ۳/۴، ۳/۴، ۳/۴ بین جوابهای مسئلهٔ ۳-۵-۵ نبود؟

**۳-۵-۹** ساختار برنج $\beta'$ طبق شکل ۳-۵-۴ مکعبی ساده است. اگر شعاعهای Cu و Zn به‌ترتیب ۰٫۱۳ nm و ۰٫۱۴ nm باشند، چگالی آن را تخمین بزنید.

جواب: $۷٫۱ \text{ Mg/m}^3 (= ۷٫۱ \text{ g/cm}^3)$

۳-۵-۱۰ نمای دوبعدی (از بالا به‌پایین نگاه کنید) اتمهای لایهٔ پایینی شکل ۳-۳-۲ را بکشید. به‌جای هر اتم درلایهٔ وسط، نقطه‌ای قرار دهید. به‌جای هر اتم درلایه بالایی، روی تصویر افقی × قرار دهید. آیا نقطه‌ها و ×ها دربلور مکانهای معادل را اشغال می‌کنند؟

**۳-۵-۱۱** با مراجعه به مسئلهٔ ۳-۵-۱۰، مقادیر $a_1$، $a_2$ و $c$ مکانهای سلول واحد برای اتم جلویی درلایهٔ وسط چقدر است؟

جواب: $a_1 = ۲/۳$ ، $a_2 = ۱/۳$ ، $c = ۱/۲$

**۳-۵-۱۲** تصویر دوبعدی افقی صفحهٔ (۱۱۱) بلور fcc را بکشید. (در جهت [۱۱۱] به‌طرف پایین نگاه کنید.) به‌جای هر اتمی که روی صفحهٔ (۱۱۱) قرار دارد نقطه‌ای قرار دهید. به‌جای هر اتم موجود درلایهٔ دوم درتصویر افقی × قرار دهید. آیا نقطه‌ها و ×ها در بلور مکانهای معادل را اشغال می‌کنند؟ جواب خود را با جواب مسئلهٔ ۳-۵-۱۰ مقایسه کنید.

۳-٦-۱ الف) خطی درجهت [۱۲۲] ازمبدأ می‌گذرد. درچه نقطه‌ای سلول واحد مرجع را ترک می‌کند؟ ب) جهت [۱۲۲] دیگری سلول واحدرا در ۱، ۱، ۱ ترک می‌کند. این خط

ازکجا وارد سلول واحد مرجع می‌شود؟

جواب: الف) ۱/۲، ۱/۲، ۱، ۱ ب) ۱/۲، ۰، ۰

۳ـ۶ـ۲ خطی درجهت [۱۱۱] ازمکان ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲، ۰ می گذرد. دومکان‌دیگررا درطول این مسیر معین کنید.

۳ـ۶ـ۳ خطی از نقطهٔ ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲، ۰ بمرکز سلول واحد مجاور با شاخصهای ۱/۲، ۱/۲، ۳/۲ رسم کنید. خط حاصل چه جهتی دارد؟

جواب: [۰۲۱]

۳ـ۶ـ۴ درسلول واحد راست‌وجهی خطی از مکان ۱/۲، ۰، ۰ به ۱/۸، ۳/۴، ۳/۴ متصل شده است. شاخص این جهت چیست؟

۳ـ۶ـ۵ الف) در بلور مکعبی، تانژانت زاویهٔ بین [۱۱۰] و جهت [۱۱۱] چقدر است؟ ب) تانژانت زاویهٔ بین جهت [۰۰۱] و جهت [۱۱۲] چقدر است؟

جواب: الف) $a/(a\sqrt{2})=0.71$ ب) $(a\sqrt{2})/(2a)=0.71$

۳ـ۶ـ۶ الف) دربلور مکعبی، $\cos$ [۱۱۳] ∡ [۱۱۰] چقدر است؟ ب) $\sin$ [۰۰۱] ∡ [۱۱۲] چقدر است؟

۳ـ۶ـ۷ زاویهٔ بین [۱۱۱] و [$1\bar{1}1$] دربلور مکعبی‌چقدراست؟ (راهنمایی: [۱۰۱] این زاویه را نصف می‌کند.)

جواب: $70.5°$

۳ـ۶ـ۸ الف) زاویهٔ بین [$\bar{1}01$] و [$\bar{1}01$] در بلور مکعبی چقدر است؟ ب) دربلور راست‌وجهی که در آن $c/a=0.55$ است چطور؟

☐ ۳ـ۶ـ۹ چگالی‌خطی‌اتمهادر (الف)جهت ⟨۱۰۰⟩ بلورمس ($a=0.361$ nm ،fcc) چقدر است؟ ب) برای جهت ⟨۱۰۰⟩ بلورآهن ($a=0.286$ nm ، bcc) چطور؟

جواب: الف) $2.77\times10^{6}$ Cu/mm ب) $3.50\times10^{6}$ Fe/mm

☐ ۳ـ۶ـ۱۰ چگالی خطی اتمها در (الف) جهت [۲۲۱] بلور مس چقدر است؟ برای جهت [۲۲۱] بلورآهن چطور؟ (برای ثابتهای شبکه به‌مسئلهٔ ۳ـ۶ـ۹ مراجعه کنید.)

۳ـ۶ـ۱۱ از محل ۱/۴، ۱/۴، ۳/۴ به مرکز سلول واحد بعدی درعقب (جهت $-x$) خطی بکشید. الف) جهت [$uvw$] بین این دونقطه را معین کنید؟ ب) سلول واحد آن راست وجهی است با $a=0.31$ nm و $c=0.33$ nm. فاصلهٔ بین دونقطه درقسمت

(الف) چقدر است؟

جواب: الف) [۳۱۲̅] ب) ۰٫۲۵۹ nm

۳-۶-۱۲ ازمحل ۱/۲، ۰، ۱/۲ در بلور آلومینیم به‌مرکز قاعدهٔ سلول واحد بعدی (جهت $x$) خطی بکشید. الف) جهت آن چیست؟ □ ب) چگالی خطی اتمها در آن جهت چقدر است؟ ج) روی شکلی، جهت موازی آن را که ازمحل ۰، ۰، ۱ می گذرد نشان دهید. درسلول واحد دومحل دیگر را نشان دهید که این خط موازی از آنها می گذرد.

□ **۳-۶-۱۳** قلع‌فلزی bct است که در آن $a=$ ۰٫۵۸۲۰ nm و $c=$ ۰٫۳۱۷۵ nm است. الف) چگالی خطی محلهای معادل در جهت ⟨۱۰۱⟩ چقدر است؟ ب) درجهت ⟨۱۱۰⟩ چطور؟ ج) درجهت ⟨۲۰۱⟩ این چگالی چقدر است؟

جواب: الف) ۱٫۵۰ × ۱۰⁶/mm ب) ۱٫۲۱ × ۱۰⁶/mm

ج) ۰٫۸۳ × ۱۰⁶/mm

□ **۳-۶-۱۴** با توجه به‌داده‌های مسئلهٔ ۳-۶-۱۳، درهرسلول واحد قلع فلزی چهار اتم وجود دارد که درمحلهای ۰، ۰، ۰ و ۱/۲، ۰، ۱/۴ و با انتقال $\pm a/2$، $\pm a/2$، $\pm c/2$ قراردارند. الف) شکلی ازسلول واحد قلع فلزی رسم کنید که محل تمام اتمها را نشان دهد؛ ب) مرکز نزدیکترین اتمهای قلع چقدر از یکدیگر فاصله دارند؟

□ **۳-۶-۱۵** با توجه به‌مسئلهٔ ۳-۶-۱۳ و ۳-۶-۱۴، چگالی خطی اتمهای قلع الف) درجهت ⟨۱۱۰⟩؛ و ب) درجهت ⟨۲۰۱⟩ چقدر است؟

جواب: الف) ۱٫۲۱ × ۱۰⁶/mm ب) ۱٫۶۶ × ۱۰⁶/mm

۳-۶-۱۶ الف) درجهات هم‌خانوادهٔ ⟨۱۰۰⟩ بلور مکعبی چند جهت وجود دارد؛ ب) درجهات هم‌خانوادهٔ ⟨۱۱۰⟩ چطور؟ درجهات هم‌خانوادهٔ ⟨۱۱۱⟩ چندجهت وجود دارد؟

**۳-۶-۱۷** الف) درجهات هم‌خانوادهٔ ⟨۲۱۰⟩ بلورمکعبی چند جهت وجود دارد؟ ب) در بلور راست‌وجهی چطور؟

جواب: الف) ۱۲ ب) ۴

۳-۷-۱ صفحه‌ای محورهای بلور را در $a=$ ۰٫۵ و $b=$ ۱ قطع می کند و موازی‌محور $z$ است. شاخصهای میلر آن چیست؟

جواب: (۲۱۰)

۳-۷-۲ صفحه‌ای‌محورها را در $a=$ ۲ و $b=$ ۱ قطع می کند. شاخصهای میلر آن چیست؟

**۳-۷-۳** شاخصهای صفحه‌ای را تعیین کنید که محلهای برخوردآن ۲ − $=a$، ۲/۳ $=b$

و $c=۳/۲$ است.

جواب: $(\bar{۳}۹۴)$

**۳-۷-۴** شاخصهای صفحه‌ای‌را تعیین کنید که‌محلهای برخورد آن $a=۱/۲$ ، $b=-۳/۲$ و $c=۱/۳$ است.

**۳-۷-۵** صفحهٔ (۲۱۱) ازمحل ۰ ، ۲، ۰ می‌گذرد محلهای برخورد آن را با محورهای مختصات تعیین کنید.

جواب: $a=۱$ ، $b=۲$ ، $c=۲$

**۳-۷-۶** صفحهٔ (۱۲۰) که ازمحل ۱، ۱، ۱ می‌گذرد درچه‌نقاطی‌محورها را قطع‌می‌کند؟

**۳-۷-۷** محلهای برخورد یک‌صفحهٔ (۱۱۱) را که از مرکزسلول واحد با شاخص ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲ می‌گذرد تعیین کنید.

جواب: $a=۱٫۵$ ، $b=۱٫۵$ ، $c=۱٫۵$

**۳-۷-۸** یک‌صفحهٔ $(۳۳\bar{۱})$ شامل مکانهای ۰، ۰، ۰ و ۱ — ، ۱، ۰ است. مکان بلوری دیگری روی این صفحه چیست؟

**۳-۷-۹** صفحه‌ای شامل‌مکانهای ۰، ۰، ۰ و ۰، ۱، ۰ و ۱/۲، ۱، ۱/۲ است، شاخصهای میلر آن چیست؟

جواب: $(\bar{۱}۰۱)$، یا $(۱۰\bar{۱})$

**۳-۷-۱۰** صفحه‌ای شامل‌مکانهای ۱/۲، ۱/۲، ۰؛ ۱، ۰، ۰؛ و ۰، ۱/۲، ۱/۲، ۰ درسلول واحد است. شاخصهای میلر آن چیست؟

**۳-۷-۱۱** الف) درهر $mm^2$ ازصفحهٔ (۱۰۰) نقره چند اتم وجود دارد؟ ب) درصفحهٔ (۱۱۰) چطور؟ ج) تعداد اتمها درصفحهٔ (۱۱۱) چقدر است؟

جواب: الف) $۱۲\times ۱۰^{۱۲}/mm^2$ ب) $۸٫۵\times ۱۰^{۱۲}/mm^2$
ج) $۱۴\times ۱۰^{۱۲}/mm^2$

**۳-۷-۱۲** الف) درهر $mm^2$ ازصفحهٔ (۱۰۰) نیکل‌چند اتم وجود دارد؟ ب) درصفحهٔ (۱۱۰) چطور؟ ج) تعداد اتمها درصفحهٔ (۱۱۱) چقدر است؟

**۳-۷-۱۳** الف) درهر $mm^2$ ازصفحهٔ (۱۱۱) آهن چند اتم وجود دارد؟ ب) درصفحهٔ (۲۱۰) نقره چطور؟

جواب: الف) $۷\times ۱۰^{۱۲}/mm^2$ ب) $۵٫۴\times ۱۰^{۱۲}/mm^2$

**۳-۷-۱۴** الف) سلول‌واحد نقره (fcc) را بکشید و صفحهٔ (۰۱۲) را سایه بزنید؛ ب) چگالی صفحه‌ای اتمها چقدر است.

**۳-۷-۱۵** الف) سلول واحد کرم (bcc) را بکشید و صفحهٔ (۱۰۲) را سایه بزنید؛ ب) چگالی صفحه‌ای اتمها چقدر است؟

جواب: $۵٫۴ \times ۱۰^{۱۲}/\mathrm{mm}^{۲}$

☐ **۳-۷-۱۶** الف) درهر $\mathrm{mm}^{۲}$ از صفحهٔ (۱۱۰) الماس چند اتم وجود دارد؟ ب) در صفحهٔ (۱۱۱) چطور؟ (شکل ۲-۲-۴ (ب) را ببینید؛ $a = ۰٫۳۵۷\ \mathrm{nm}$.)

☐ ۳-۷-۱۷ الف) فصل مشترك بین صفحات (۱۱۰) و $(۱\bar{۱}۱)$ در بلور مکعبی چیست؟ ب) در بلور راست‌وجهی چطور؟

جواب: الف) $[\bar{۱}۱۲]$ ب) $[\bar{۱}۱۲]$

☐ ۳-۷-۱۸ الف) فصل‌مشترك صفحات (۱۱۲) و (۰۱۰) چیست؟ ب) صفحات (۱۱۲) و (۱۱۰) چطور؟

☐ ۳-۷-۱۹ شاخصهای $\{hkil\}$ که محورها را در $a_۱ = ۱$ ؛ $a_۲ = ۱$ و $c = ۰٫۵$ قطع می‌کنند معین کنید.

جواب: (۱۱۲۲)

☐ **۳-۷-۲۰** کدامیك از اتمهای کشیده‌شده در شکل ۳-۳-۲ (الف) در آن صفحهٔ (۱۰۱۱) که محور عمودی را در $c = ۱$ قطع می‌کند قرار دارد؟ (دقت کنید، احتمال اشتباه در پاسخ این سؤال بسیار است.)

☐ **۳-۷-۲۱** الف) صفحاتی را کـه به‌خانوادهٔ {۱۰۰} بلور راست‌وجهی تعلق دارنـد نام ببرید؛ ب) صفحات خانوادهٔ {۰۰۱} را هم نام ببرید.

جواب: الف) (۱۰۰)(۰۱۰)$(\bar{۱}۰۰)$$(۰\bar{۱}۰)$ ب) (۰۰۱)$(۰۰\bar{۱})$

۳-۷-۲۲ دوازده صفحهٔ متعلق به‌خانوادهٔ {۱۱۰} در بلور مکعبی را نام ببرید.

۳-۷-۲۳ چـه جهاتی از ⟨۱۱۰⟩ در صفحهٔ (۱۱۱) مس قـرار دارنـد؟ ب) در صفحهٔ $(۱\bar{۱}۱)$ چطور؟

جواب: الف) $[۱\bar{۱}۰]$، $[\bar{۱}۰۱]$، $[۰۱\bar{۱}]$ وعکس آنها ب) [۱۱۰]، $[\bar{۱}۰۱]$، [۰۱۱] و عکس آنها.

۳-۷-۲۴ الف) چه جهاتی از ⟨۱۱۱⟩ در صفحهٔ (۱۱۰) آهن قرار دارنـد؟ در صفحهٔ

(۱۱۰) چطور؟

□ ۳ـ۸ـ۱ ثابت شبکه برای سلول واحد آلومینیم برابر است با $0.4049$ nm، مطلوب است تعیین الف) $d_{220}$ ب) $d_{111}$ ج) $d_{200}$

جواب: الف) $0.1431$ nm ب) $0.2337$ nm ج) $0.2024$ nm

□ ۳ـ۸ـ۲ ساختار نیکل، مکعب با وجوه مرکزدار با شعاع اتمی $0.1246$ nm است تعیین الف) $d_{200}$ ب) $d_{220}$ ج) $d_{111}$

□ ۳ـ۸ـ۳ فاصلهٔ بین صفحات (۱۱۰) در فلز مکعبی مرکزدار $0.203$ nm است. الف) اندازهٔ سلول واحد چقدر است؟ ب) شعاع اتمها را تعیین کنید ج) این فلز، چه فلزی می‌تواند باشد؟

جواب: الف) $0.287$ nm ب) $0.124$ nm ج) آهن bcc یا Cr (نه Ni)

□ ۳ـ۸ـ۴ فضای بین صفحه‌ای $d_{111}$ در فلزی fcc برابر $0.235$ nm است. الف) اندازهٔ سلول واحد آن را تعیین کنید؟ ب) شعاع اتمی چقدر است؟ ج) این فلز چه فلزی می‌تواند باشد؟

□ ۳ـ۸ـ۵ اشعهٔ ایکسی باطول موج $0.058$ nm برای محاسبهٔ $d_{200}$ نیکل به‌کار رفته است. زاویهٔ تفرق $2\theta$ برابر $19°$ است. اندازهٔ سلول واحد آن چقدر است؟ $(n=1)$

جواب: $0.35$ nm

□ ۳ـ۸ـ۶ برای اندازه گیری طول موج اشعهٔ ایکس از بلور سدیم کلرید استفاده می‌شود. زاویهٔ تفرق $2\theta$، برای فاصلهٔ $d_{111}$ یونهای کلر برابر $10.2°$ است. طول موج چقدر است؟ (ثابت شبکه‌ای برابر $0.563$ nm است.)

□ ۳ـ۸ـ۷ اولین خط (کمترین $2\theta$) شکل ۳ـ۸ـ۳ (ب) برای فاصلهٔ $d_{110}$ در تنگستن است. الف) زاویهٔ تفرق $2\theta$ را با شکل تعیین کنید؛ ب) شعاع اتم تنگستن $0.1367$ nm است. چه طول موجی به‌کار رفته است؟ ج) دومین خط تفرق برای چه فاصلهٔ $d_{hkl}$ای است؟ $(n=1)$

جواب: الف) $41°$ ب) $0.156$ nm ج) $d_{200}$ و $\therefore h^2+k^2+l^2=4$

□ ۳ـ۸ـ۸ اولین خط (کمترین $2\theta$) شکل ۳ـ۸ـ۳ (الف) برای فاصلهٔ $d_{111}$ در مس است. الف) مقدار $2\theta$ در آن چقدر است؛ ب) شعاع اتم مس $0.1278$ nm است. طول موج اشعهٔ ایکس را حساب کنید. ج) دومین خط تفرق برای چه فاصله $d_{hkl}$ای است؟

# ۴

## بی‌نظمی اتمی در جامدات

### چشم‌انداز فصل

طبیعت کامل نیست: ذاتاً نوعی بی‌نظمی در آن است. بنابراین ساختارهایی که در فصل سوم تشریح شدند، استثناهایی دارند که اغلب جزئی‌اند: ازهر $10^{10}$ اتم شاید یکی درجای خودش نباشد. این استثناها گرچه جزئی‌اند اما اهمیت دارند و رفتار نیمرساناها، انعطاف‌پذیری فلزات، و استحکام‌بخشیدن به آلیاژها، ناشی از آنهایند. همین نقصها هستند که رنگ یاقوت کبود را موجب می‌شوند. همچنین حرکت اتمها را درحین عملیات گرمایی ممکن می‌سازند و درنتیجه ساختارهای جدید و خواص بهتری به‌وجود می‌آید.

دراین‌فصل نخست ناخالصیها، سپس نقصهای خطی-بلوری بررسی می‌شوند. بعضی ازجامدات آنقدر بی‌نظم‌اند که آنها را بلوری به‌حساب نمی‌آوریم. درپایان برارتعاشات اتمی وحرکتهای درون جامدات نیز نظرخواهیم کرد.

## هدف ازمطالعه

۱. کاربرد اطلاعاتی که در شیمی درمورد محلولهای مایع کسب کرده‌اید، برای مفاهیم جدید در مورد محلولهای جامد. (این شامل محلولهای جامد جانشینی و بین‌نشینی و نااستوکیومتری می‌شود.)

۲. تعریف عیوب بلوری به صورت صفربعدی (تهیجای و بین‌نشینی)، یك‌بعدی (نابجایی)، یا دوبعدی (مرز و سطح) و تشریح انرژی لازم برحسب فواصل بین اتمی.

۳. توانایی شاخص گذاری کمی سطح مرزدانه در جامد (وآشناشدن با شاخص بین‌المللی «اندازهٔ دانهٔ ASTM»).

۴. فرق گذاشتن بین تغییراتی که با (الف) انجماد مواد بلوری، و (ب) انجماد مواد بی‌شکل (غیربلوری) همراهند.

۵. دانستن‌عواملی که برنفوذپذیری‌حرکت اتمها اثرمی‌گذارد. این‌عوامل در فرایندهای ساخت و عملیات گرمایی اهمیت بسیار دارند.

## ۴ـ۱ ناخالصیهای درون جامدات

آنچه‌که ناب است مطلوب است؛ بنابراین پشم‌خالص و شکر تصفیه شده را معمولا ترجیح می‌دهیم و طلای ۲۴ عیار را می‌پسندیم. اگرچه این‌ایدئالها ممکن‌است بسیارخوب باشند، درمواردی به‌خاطرقیمت، قابلیت‌دسترسی، یا خواص‌وجود ناخالصیها درآنها مناسب‌است. مثلا نقرهٔ استرلینگ، شامل ۷٫۵٪ مس و تنها ۹۲٫۵٪ نقره است(مثال۲ـ۱ـ۱).این‌ماده که ارزش زیادی دارد، می‌توانست به خوبی تا بیش از ۹۹٪* خلوص تصفیه شود. درآن صورت قیمت‌آن بیشتربود.ولی‌کیفیت‌آن پایین می‌آمد. وجود ۷٫۵٪ مس بدون‌اینکه در ظاهرجسم‌تغییری‌دهد، نقره را محکمتر، سخت‌تر، و درنتیجه با دوامتر می‌سازد، درعین‌حال قیمت‌آن نیزکمتر می‌شود!

البته باید خواصی را که با طراحیمان مناسبت دارند مورد توجه قراردهیم. با افزایش روی به‌مس برنج تولید می‌شود که آن‌هم از مس خالص ارزانتر است. برنج سخت‌تر، قویتر و انعطاف‌پذیرتر ازمس است. درعوض رسانندگی‌الکتریکی برنج ازمس، کمتراست، بنابراین برای‌سیمکشی‌الکتریکی و مصارف مشابهی‌که در آن‌رسانندگی‌اهمیت دارد، ازمس خالص‌که‌گرانتر است استفاده می‌کنیم.

آلیاژها آمیخته‌ای از دو یا چند فلزندکه به‌صورت یك‌ماده درمی‌آیند. این‌آمیخته‌ها می‌توانند مخلوطی از دونوع ساختار بلوری باشند (مانند آهن bcc و $Fe_3C$ در

---

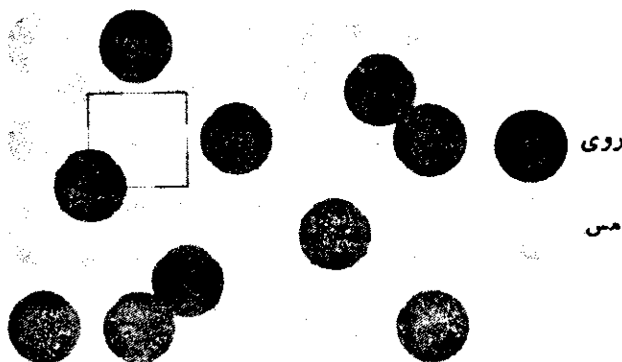
* همان‌طورکه درپانوشت مثال ۲ـ۱ـ۱ گفته‌شد، درموردمایعات و جامدات معمولا درصدوزنی (w/o) به‌کارمی‌رود، مگراینکه مخصوصاً طور دیگری بیان شود.

تیر فولادی پل). ازطرف دیگر آلیاژها ممکن است شامل محلولهای جامد باشند، که مثال آن در بخش بعد درمورد برنج خواهد آمد. اگرچه واژهٔ آلیاژ را معمولا درمورد محصولات سرامیکی به‌کار نمی‌برند، ولی ترکیبات مختلف دو یا چند جزء اکسیدی می‌توانند به طور سودمندی به‌هم بپوندند و محصولات سرامیکی‌را به‌وجود آورند (مانند عایق شمع اتومبیل درشکل ۲ـ۷ـ۳). به‌همین ترتیب تلفن پلاستیکی شکل ۲ـ۷ـ۲ شامل آمیخته‌ای ازچندنوع مولکول است.

## ۴-۲ محلولهای جامد درفلزات

اگر اتمهای حل‌شونده و حلال اندازه‌های مشابه و ساختارهای الکترونی نظیرهم داشته باشند، محلولهای جامد به‌آسانی تشکیل می‌شوند. مثلا شعاع اتمهای تشکیل دهندهٔ برنج یعنی مس و روی به ترتیب ۱۲۷۸ nm ر۰ و ۱۳۹ nm ر۰ است. هر دو ۲۸ الکترون زیرظرفیتی‌دارند هرکدام ساختار بلوری‌خود را با عددکوئوردیناسیون ۱۲ تشکیل‌می‌دهد. بنابراین وقتی‌روی به‌مس افزوده‌شود، درشبکهٔ fcc مس به‌راحتی به‌جای‌آن قرارمی‌گیرد تا جایی‌که جانشین حداکثر ۴۰٪ اتمهای مس می‌شود. دراین محلول جامد مس و روی، توزیع روی‌کاملا تصادفی است (شکل ۴ـ۲ـ۱ را ببینید).

**محلولهای جامد جانشینی.** محلول جامدی که دربالا تشریح شد محلول جامد جانشینی نام دارد، زیرا اتمهای روی درساختار بلوری مس جانشین اتمهای آن می‌شوند. این‌نوع محلول جامد دربین سیستمهای فلزی گوناگون کاملا متداول است. مثال دیگر آن محلول مس و نیکل درتشکیل کاپرونیکل است که درآن اتمهای نیکل‌می‌تواند جایگزین هرکسری از اتمهای ساختار اولیهٔ مس شود. محلولهای جامد مس-نیکل می‌توانند درگستره‌ای بین




**شکل ۴-۲-۱** جانشینی تصادفی در محلولهای جامد (روی در مس یعنی برنج). الگوی بلوری تغییری نکرده است.

۱۰۰٪ مس بدون نیکل، تا تقریباً ۱۰۰٪ نیکل و عملا بدون مس تغییر یابند. تمام آلیاژهای مس-نیکل مکعبی با وجوه مرکز دار هستند.

از طرف دیگر، قلع تا حد معینی می‌تواند جانشین مس شود و بدون تغییر دادن ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار آن، مفرغ تشکیل دهد. اگرمقدار قلع از بیشینهٔ حلالیت آن در حالت جامد بیشتر باشد باید فاز دیگری تشکیل دهد. درفصل نهم حد حلالیت با جزئیات بیشتری بررسی خواهد شد.

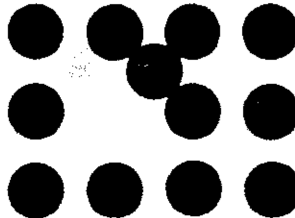
اگرقرار باشد جایگزینی وسیعی درمحلولهای جامد نوع جانشینی‌صورت گیرد، لازم است اتمها تقریباً هم اندازه باشند. نیکل و مس گسترهٔ کاملی از حلالیت دارند زیرا هر دو ساختار مجزای آنها fcc و شعاع اتمی آنها به‌ترتیب ۰٫۱۲۴۶ nm و ۰٫۱۲۷۸ nm است. اگر تفاوت اندازه زیادتر شود، اتمهای کمتری می‌توانند جانشین شوند. تنها ۲۰٪ اتمهای مس می‌توانند با اتمهای آلومینیم جایگزین شوند، زیرا درمقایسه با شعاع ۰٫۱۲۷۸ nm اتم مس، آلومینیم شعاعی برابر ۰٫۱۴۳۱ nm دارد. اگر اختلاف شعاع دونوع اتم بیش از ۱۵٪ باشد، حلالیت در حالت جامد به‌ندرت به‌طور وسیعی اتفاق می‌افتد. اگر دوجزء مختلف باشند یا ظرفیت متفاوت داشته باشند، حلالیت محدودتر است.

عامل محدودکننده، وزن اتمهای جانشین شده نیست بلکه تعداد اتمهای جانشین شده است. با این‌حال مهندسان معمولا ترکیب را به‌صورت درصد وزنی بیان می‌کنند. بنابراین لازم است بدانیم که چگونه درصد وزنی به‌درصد اتمی تبدیل‌می‌شود، و برعکس (مثال ۴-۱-۱ را ببینید).

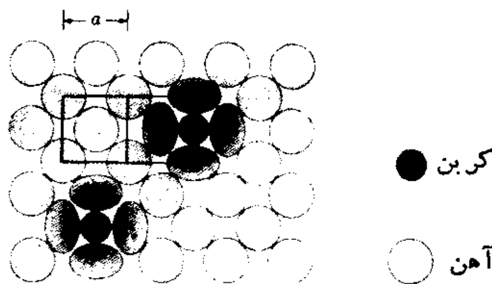
☐ **محلولهای جامد منظم.** شکل ۴-۲-۱ جانشینی تصادفی اتمی به جای اتم دیگر را درساختار بلوری نشان می‌دهد. درچنین محلولی، احتمال اینکه هر عنصرجای اتم خاصی را دربلور اشغال‌کند برابر درصد اتمی آن عنصر درآلیاژ است. دراین حالت هیچ نظمی درجانشینی دوعنصر وجود ندارد.

با این‌حال شاید بتوان نظمی درآرایش ویژهٔ دونوع اتم یافت. شکل ۴-۲-۲ ساختار منظمی‌را نشان می‌دهدکه درآن بیشتر اتمهای تیره با اتمهای روشن احاطه شده‌اند. چنین نظمی در دماهای بالاتر کمتر دیده‌می‌شود زیرا تحرک‌گرمایی زیاد، آرایش منظم را ازمیان می‌برد.

**محلولهای‌جامد بین‌نشینی.** شکل ۴-۲-۳ نوع دیگری ازمحلول جامد را نشان می‌دهد، هراتم‌کوچك می‌تواند درفضای خالی بین اتمهای بزرگتر جای‌گیرد. کربن درآهن مثالی از این‌نوع است. در دماهای زیر ۹۱۲°C(۱۶۷۳°F)، آهن‌خالص دارای ساختارمکعبی مرکزدار است؛ بالاتر از ۹۱۲C(۱۶۷۳°F)، درگستره‌ای از دما، آهن ساختار مکعبی با وجوه مرکزدار دارد. درشبکه مکعبی با وجوه مرکزدار، درمرکز سلول واحد فضای خالی



**شکل ۴-۲-۲** محلول جامد جانشینی منظم. اکثریت (ولی نه تمامی) اتمها درمیان اتمهای نامشابه با خودشان قرار گرفته اند. اگر این نظم کامل باشد، مادهٔ مرکب شکل می گیرد (بخش ۴-۳).




**شکل ۴-۲-۳** محلول جامد بین نشینی، (کربن در آهن fcc).

یا «حفرهٔ» نسبتاً بزرگی وجود دارد. کربن، که اتم بسیار کوچکی است، می تواند به درون این حفره برود و محلول جامد آهن و کربن را تولید کند. در دماهای پایینتر که آهن ساختار مکعبی مرکزدار دارد، فضاهای خالی بین اتمهای آهن بسیار کوچکتر است. در نتیجه حلالیت کربن در آهن مکعبی مرکزدار بسیار محدود است.

**مثال ۴-۲-۱** مفرغ آلیاژ محلول جامدی از مس و قلع است که در آن کم و بیش حدود ۳٪ اتمهای مس با اتمهای قلع جایگزین شده اند. ساختار سلول واحد مس، fcc باقی مانده است، ولی اندکی منبسط شده، زیرا شعاع اتم قلع تقریباً ۱۵۱ nm ره است. الف) درصد وزنی مفرغی که a/o ۳ قلع دارد چقدر است؟ ب) اگر فرض کنیم ثابت شبکه به طور خطی با درصد اتمی قلع افزایش یابد، چگالی این مفرغ چقدر است؟

حل: ۲۵ سلول واحد fcc = ۱۰۰ اتم : مبنا

الف)

$$۹۷(۶۳٫۵۴\ \text{amu}) = ۶۱۶۳\ \text{amu} = ۰٫۹۴۵\ (\text{یا}\ ۹۴٫۵\ \text{w/o})$$

$$۳(۱۱۸٫۶۹\ \text{amu}) = \underline{۳۵۶}\ \text{amu} = ۰٫۰۵۴\ (\text{یا}\ ۵٫۴\ \text{w/o})$$

$$۶۵۱۹$$

ب)

$$\text{شعاع متوسط} = ۰٫۹۷(۰٫۱۲۷۸\ \text{nm}) + ۰٫۰۳(۰٫۱۵۱\ \text{nm}) = ۰٫۱۲۸۵\ \text{nm}$$

$$a = \frac{(۴)(۰٫۱۲۸۵)}{\sqrt{۲}} = ۰٫۳۶۳۴\ \text{nm}$$

$$\rho = \frac{۶۵۱۹\ \text{amu}/(۰٫۶۰۲ \times ۱۰^{۲۴}\ \text{amu/g})}{۲۵(۰٫۳۶۳۴ \times ۱۰^{-۹}\ \text{m})^۳}$$

$$= ۹٫۰\ \text{Mg/m}^۳ (= ۹٫۰\ \text{g/cm}^۳)$$ ▲

**مثال ۴-۲-۲** بیشینهٔ حد حلالیت قلع در مفرغ در $۵۸۶^\circ C$ معادل ۱۵٫۸ درصد وزنی است. درصد اتمی قلع چقدر است؟

حل: $۱۰۰۰۰۰\ \text{amu} = ۱۵۸۰۰\ \text{amu Sn} + ۸۴۲۰۰\ \text{amu Cu}$ : مبنا

$$\text{Cu تعداد اتمهای} = \frac{۸۴۲۰۰}{۶۳٫۵۴} = ۱۳۲۵\ ,\ ۹۰٫۹\ \text{a/o Cu}$$

$$\text{Sn تعداد اتمهای} = \frac{۱۵۸۰۰}{۱۱۸٫۶۹} = \underline{۱۳۳}\ ,\ ۹٫۱\ \text{a/o Sn}$$ ▲

$$۱۴۵۸$$

**مثال ۴-۲-۳** در $۱۰۰۰^\circ C$، محلول جامد کربن در آهن fcc می‌تواند حاوی ۱٫۷ w/o کربن باشد (شکل ۴-۲-۳). در هر ۱۰۰ سلول واحد چند اتم کربن موجود است؟

حل: ۴۰۰ اتم آهن = ۱۰۰ سلول واحد : مبنا

$$(۴۰۰\ \text{Fe})(۵۵٫۸۵\ \text{amu/Fe}) = ۲۲۳۴۰\ \text{amu}$$

$$\text{برای C ۱٫۷٪،}\quad ۲۲۳۴۰\left(\frac{۱٫۷}{۹۸٫۳}\right) = ۳۸۶٫۳\ \text{amu C}$$

$$\frac{۳۸۶٫۳\ \text{amu}}{(۱۲٫۰۱\ \text{amu/C اتم})} = ۳۲\ \text{اتم کربن}$$

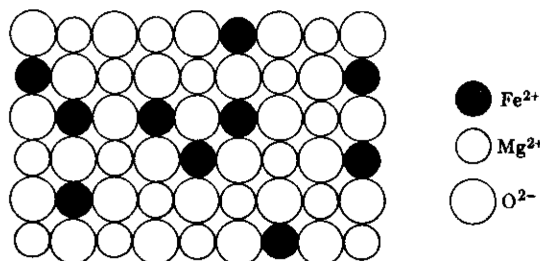
توضیح. تقریباً در ۱/۳ سلولهای‌واحد، اتم کربن درمکان ۲/۱، ۱/۲، ۲/۱، ۱/۲، قرار می گیرد. چون اتم کربن‌اندکی ازحفره بزرگتراست، ممکن نیست که در تمام مکانهای معادل وجود داشته باشد. ▲

## □ ۴-۳ محلولهای جامد درمواد مرکب

محلولهای جامد جانشینی، درفازهای یونی نیز مانند فلزات می‌توانند وجود داشته باشند. در فازهای یونی، نیز مانند فلزات جامد، اندازهٔ اتم یا یون مهم است. شکل ۴-۳-۱ مثال ساده‌ای از محلول جامد یونی‌را نشان می‌دهد. این ساختار متعلق به $MgO$ است (شکل ۳-۱-۱)که درآن یونهای $Mg^{2+}$ با یونهای $Fe^{2+}$ جایگزین‌شده‌اند. ازآنجاکه شعاع دویون برابر ۰٫۰۶۶ nm و ۰٫۰۷۴ nm است، جانشینی‌کامل امکانپذیر است. از طرف دیگریونهای $Ca^{2+}$ نمی‌توانند به‌طریق مشابه جانشین یونهای $Mg^{2+}$ شوند زیرا شعاع آنها ۰٫۰۹۹ nm و نسبتاً بزرگ است.*

مسئلهٔ دیگری که وجود آن درمحلولهای جامد سرامیکی‌ضروریتر از محلولهای‌جامد فلزی است، این است که بارهای ظرفیتی یون جایگزین شده و یون جدید باید مساوی باشند. مثلا قراردادن $Li^{+}$ به‌جای $Mg^{2+}$ در$MgO$. اگرچه شعاع هردوی آنها تقریباً برابر است، مشکل‌خواهد بود زیرا نقصان بار به‌وجود می‌آید. این‌جانشینی‌تنها درصورتی می‌تواند تحقق یابد که تغییرات متعادل‌کنندهٔ دیگری دربارها رخ دهد، (بخش ۸-۴ را ببینید).

**مواد مرکب نااستوکیومتری.** بسیاری از مواد مرکب دارای نسبتهای دقیقی از عناصرند (مانند $H_2O$، $CH_4$، $MgO$، $Al_2O_3$، $Fe_3C$، که دراین‌مورد مثالهای‌اندکی به‌شمار




**شکل ۴-۳-۱** محلول جامد جانشینی درترکیب. درساختار $MgO$، $Fe^{2+}$ جانشین $Mg^{2+}$ شده است.

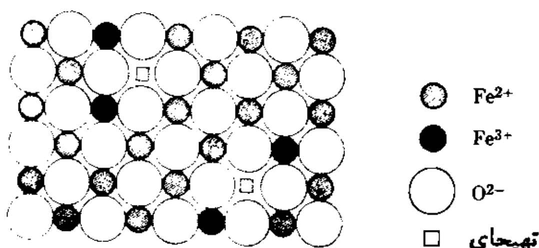
* درمورد شعاعهای یونی به‌پیوست (ب) مراجعه کنید.

می‌روند). نسبت اتمها در اینها ثابت است؛ بنابراین استوکیومتری‌اند. بین اتمهای نامشابه پیوند تشکیل می‌شود. درنتیجه ساختار آن حتی از آنچه که در شکل ۲-۲-۲ دیدیم، کاملتر می‌شود.

دستهٔ دیگری ازمواد مرکب نسبتهای صحیح و مشخصی برای دو (یا چند) عنصرخود ندارند. دراین حالت «$Cu_2Al$» به‌جای‌نسبت دقیق (۱/۳)۳۳ درصد اتمی Al درحدود ۳۱ تا ۴۷ درصد اتمی Al (۱۶ تا ۲۰ درصد وزنی Al) دارد. همچنین در $1000°C$ «FeO» از ۵۱ تا ۵۳ درصد اتمی اکسیژن دارد، درحالی‌که باید دقیقاً ۵۰ درصد اتمی اکسیژن داشته باشد. این مواد مرکب را نااستوکیومتری می‌نامیم زیرا نسبت ثابتی از اتمها ندارد.

ترکیبات نااستوکیومتری همیشه شامل نوعی محلول جامدند. در مثال $Cu_2Al$ که قبلا شرح داده شد، اتمها تقریباً به‌قدرکافی هم‌اندازه و ازنظر الکترونیکی قابل مقایسه‌اند، به‌طوری‌که درصورت وجود آلومینیم زیادتر، تعداد بیشتری از اتمهای مس با اتمهای آلومینیم جایگزین می‌شوند (بیشینه‌تا۴۷ درصداتمی Al). برعکس درحضورمس اضافی، با جانشین شدن تعدادکمی اتمهای مس به‌جای اتمهای آلومینیم در$Cu_2Al$، نسبت‌اتمی Cu/Al به ۶۹/۳۱ می‌رسد.

نااستوکیومتری بودن $Fe_{1-x}O$ علت متفاوتی دارد. یونهای آهن و اکسیژن‌آنقدر متفاوت‌اندکه درصد جانشینی‌آنها قابل‌اندازه‌گیری نیست. با این‌حال‌ترکیبات‌آهن همیشه درکنار یونهای‌فرو ($Fe^{2+}$) تعدادی یون‌فریك ($Fe^{3+}$) نیزدارند. بنابراین‌برای‌ترازمندی بارها، همیشه باید بیشتر از ۵۰ درصد اتمی اکسیژن موجود باشد. درحقیقت هر دویون $Fe^{3+}$ به یك یون اضافی $O^{2-}$ احتیاج دارد، یا برعکس هرجفت یون $Fe^{3+}$ باید با یك تهیجای‌کاتیونی‌همراه باشد، (شکل ۴-۳-۲). این‌ساختار را ساختار معیوب می‌نامند، زیرا




**شکل ۴-۳-۲** ساختار ناقص ($Fe_{1-x}O$) این ساختار نظیر NACl (شکل ۳-۱-۱) است. با این‌تفاوت‌که تعدادی تهیجای یون‌آهن درآن وجود دارد. ازآنجاکه‌کسری از یونهای آهن به‌جای $Fe^{2+}$، یونهای $Fe^{3+}$ اند، وجود تهیجایها برای ترازمندی بار لازم است، مقدار x از ۰٫۰۴ تا ۰٫۱۶، بسته به‌دما و مقدار اکسیژن موجود، تغییرمی‌کند.

درفشردگی اتمها بی‌نظمیهایی وجود دارد. در $1000°C$ اگر آهن به‌حد اشباع وجود داشته باشد، ترکیب آن $Fe_{0.96}O$ و اگر اکسیژن به‌حد اشباع وجود داشته باشد، ترکیب آن $Fe_{0.88}O$ است.

این ساختارهای ناقص درفصل بعدکه درباره رسانندگی الکتریکی بحث می‌کنیم اهمیت خواهد داشت. همچنین بعداً در این فصل خواهیم دید که اتمها یا یونها با وجود تهیجایها راحت‌تر می‌توانند درمیان جامدات بلوری نفوذکنند.

**مثال ۴-۳-۱** اکسیدی از آهن (شکل ۴-۳-۲) ۵۲ درصد اتمی اکسیژن دارد و ثابت شبکهٔ آن $0.429\ nm$ است. الف) نسبت یونی $Fe^{2+}/Fe^{3+}$ چقدر است؟ ب) چگالی این اکسید چقدر است؟ (این‌ساختار بجزدرموردتهیجایهای □ ، شبیه به NACl است.)

حل: مبنا : یون $100 = 52\,O^{2-} + 48\,Fe + 4\,\square$

الف)

ترازمندی بار : $52(2-) + (y)(3+) + (48-y)(2+) = 0$

$$y = 8\,Fe^{3+} \qquad 48 - y = 40\,Fe^{2+}$$

$$Fe^{2+}/Fe^{3+} = 5$$

ب) با وجود ۴ آنیون در سلول واحد (مطابق شکل ۳-۱-۱)، ۱۳ سلول واحد داریم

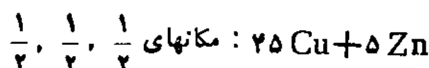
$$\rho = \frac{[48(55.8) + 52(16)]\,amu/13\,u.c.}{(0.602 \times 10^{24} amu/g)(0.429 \times 10^{-9} m)^3/u.c.}$$

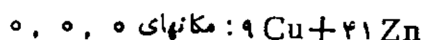
$$= 5.7\,Mg/m^3 (= 5.7\,g/cm^3) \qquad ▲$$

□ **مثال ۴-۳-۲** برنج $\beta'$ اسماً ترکیب بین فلزی، CuZn، با ساختار مکعبی ساده مطابق شکل ۳-۵-۴ است. آن را می‌توان محلول جامد منظم جزئی نیز نامید، مخصوصاً به این‌خاطر که در $450°C$ درگسترهٔ ۴۶ تا ۵۰ درصد اتمی روی، نااستوکیومتری است. فرض کنید که درآلیاژ ۴۶ درصد اتمی Zn و ۵۴ درصد اتمی Cu ، اتمهای مس مطابق شکل ۳-۵-۴ ، ۹۰٪ ازمکانهای ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲ را اشغال کرده باشند. چه درصدی ازمکانهای ۰، ۰، ۰ را اتمهای مس اشغال می‌کنند؟

حل: (و ۵۰ مکانهای ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲) مکانهای ۰، ۰، ۰ ۵۰ = ۵۰ سلول‌واحد: مبنا







درنتیجه ۹ از ۵۰ یا ۱۸٪ ازمکانهای ۰، ۰، ۰ به‌وسیلهٔ اتمهای مس اشغال شده است.

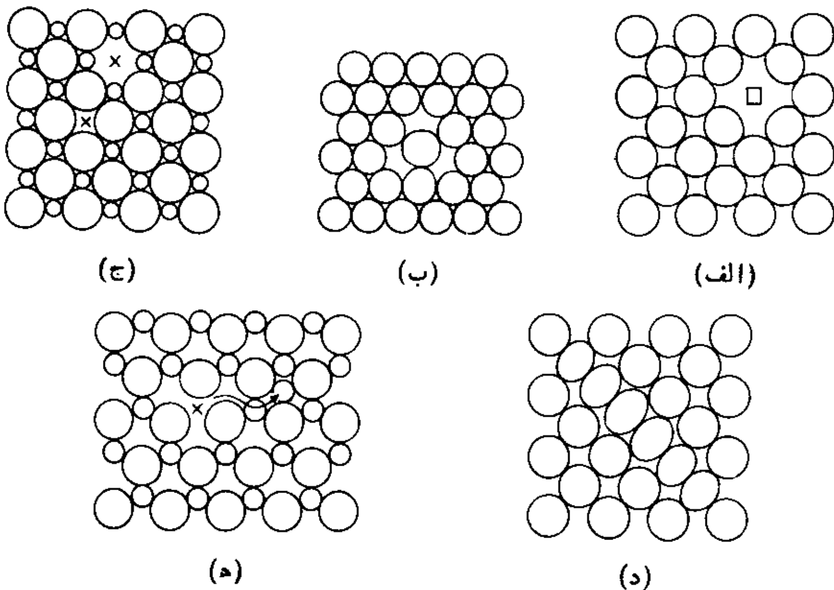
توضیح. در دماهای پایین تقریباً تمام همسایه‌های اتمهای روی را اتمهای مس تشکیل می‌دهند و برعکس. با این‌حال با افزایش دما اتمها شروع به بی‌نظم‌شدن می‌کنند. در این مسئله، در ۴۵۰°C مکانهای ۰، ۰، ۰ به‌صورت ۱۸ Cu — ۸۲ Zn است، درحالی‌که مکانهای ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲، به‌صورت ۹۰ Cu — ۱۰ Zn است و تمام به‌صورت‌درصد اتمی). بنابراین دومکان یکسان نیستند و ساختارآن مکعبی ساده است.

بالاتر از ۴۷۰°C، این آلیاژ کاملا بی‌نظم و تصادفی می‌شود، به‌طوری‌که برای اتمهای مس هیچ ارجحیتی در اینکه اتمهای روی دور آنها را بگیرند، وجود ندارد. تحت این شرایط، محلول جامد جانشینی (به جای برنج $\beta'$ برنج $\beta$ نامیده می‌شود) ساختار bcc دارد، زیرا احتمال داشتن‌همان ترکیب میانگین درمراکز و گوشه‌های سلول واحد یکسان است. ▲

## ۴-۴ عیوب در بلورها

هم‌اکنون نوعی عیب را در بلورها مشاهده‌کردیم در اینجا یك تهیجای لازم بود تا نامتعادل بودن بار الکتریکی را جبران کند (شکل ۴-۳-۲). وقتی عیوبی نظیر تهیجاها فقط یك یا چند اتم را دربرگیرد، آن را عیوب نقطه‌ای می‌نامیم. عیوب دیگری ممکن است درمیان بلور به‌صورت خطی وجود داشته باشند، بنابراین واژهٔ عیوب خطی درموردآنها به‌کار می‌رود. اگر تغییرشکل پلاستیکی بلور به‌وسیلهٔ تنشهای برشی انجام می‌گیرد، این دسته از عیوب اهمیت ویژه‌ای خواهند یافت. درحقیقت حضور تعدادکمی از آنها باعث می‌شودکه بلورهای فلزی ۱۰۰۰ بار انعطاف‌پذیرتر شوند. اگر این عیوب خطی به‌تعداد زیاد وجود داشته باشند موجب افزایش استحکام فلز می‌شوند. بالاخره نوع دیگری ازعیوب ازنظر مفهوم دوبعدی‌اند و شامل سطوح خارجی یا مرزهای داخلی‌اند.

**عیوب نقطه‌ای.** ساده‌ترین عیب نقطه‌ای تهیجای است، که عبارت از اتم گمشده‌ای درون فلز است. [شکل ۴-۴-۱ (الف)]. این عیوب می‌توانند نتیجهٔ ترتیب و فشردگی ناقص




**شکل ۴-۴-۱** عیوب نقطه‌ای، الف) تهیجای □ ؛ ب) تهیجای دوتایی؛ ج) تهیجای جفت‌یونی (عیب‌شاتکی)؛ د) بین‌نشینی؛ ه) جابه‌جایی یون (عیب فرنکل)٠

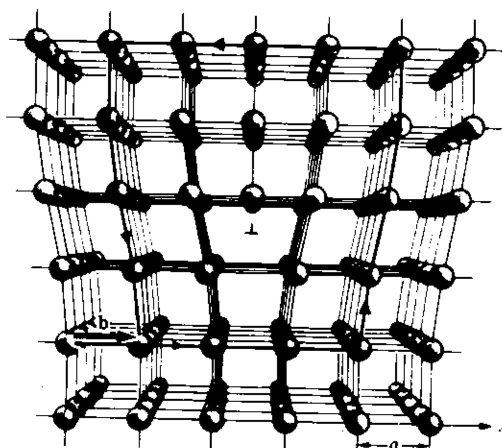
درحین تبلور اولیه باشند، یا در اثر ارتعاشات گرمایی اتمها در دماهای بالا به‌وجودآیند (بخش ۴-۶)، زیرا با افزایش انرژی‌گرمایی، احتمال اینکه هریك از اتمها از مکان خود، در پایینترین سطح انرژی، بیرون‌جهند، زیاد می‌شود. تهیجایها می‌توانند تکی‌باشند، مانند ۴-۴-۱(الف) یا دو یا چند تهیجای می‌توانند به‌هم بپیوندند و تهیجای دوتایی [شکل ۴-۴-۱ (ب)] یا سه‌تایی تشکیل دهند.

تهیجای جفت یونی. (که عیب شاتکی نامیده‌می‌شود) در ترکیباتی یافت می‌شود که درآنها ترازمندی بار باید حفظ شود [شکل ۴-۴-۱ (ج)]. این ترکیبات دارای تهیجایهای جفت یونی با بار مخالف‌اند. تهیجای جفت یونی نیز مانند تهیجای تکی‌نفوذ اتمی را آسانترمی‌کند (بخش ۴-۷).

گاهی اتم اضافی، خود را درون ساختار بلوری جای می‌دهد به‌ویژه اگر ضریب فشردگی اتمی پایین باشد. چنین عیبی را که باعث اعوجاج ساختمان اتمی می‌شود، بین‌نشینی می‌نامند [شکل ۴-۴-۱ (د)].

جابه‌جایی یون از شبکه به‌محل بین‌نشینی [شکل ۴-۴-۱ (ه)] عیب‌فرنکل نام‌دارد. درساختارهای فشرده بین‌نشینی و عیوب فرنکل کمتر از تهیجایهاست، زیرا برای بردن اتمها به‌محلهای بین‌نشینی انرژی اضافی لازم است.

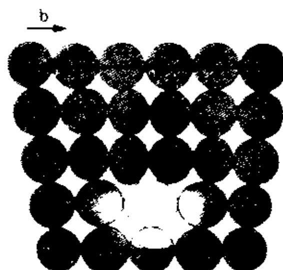
**عیوب‌خطی (نابجاییها).** معمولیترین نوع عیب خطی در درون بلور، نابجایی است.




**شکل ۴ــ۴ــ۲** نابجایی لبه‌ای، ⊥ ، عیب‌خطی در لبهٔ صفحهٔ اضافی‌اتمها به‌وجود می‌آید. بردار لغزش b میزان جابه‌جایی حاصل است.

شکل۴ــ۴ــ۲ نابجایی لبه‌ای‌را نشان می‌دهد. می‌توان‌آن‌را به‌صورت‌لبهٔ‌صفحهٔ اتمی‌اضافی در درون ساختار بلوری تعریف کرد. همراه با نابجایی لبه‌ای ناحیه‌های فشاری وکششی وجود دارند (شکل ۴ــ۴ــ۳)، به‌طوری‌که در امتداد نابجایی افزایش انرژی به‌وجود می‌آید. مسافت جابه‌جایی اتمها حول نابجایی بردار لغزش b*، نامیده‌می‌شود. این بردار با خط نابجایی لبه‌ای زاویه قائمه می‌سازد.

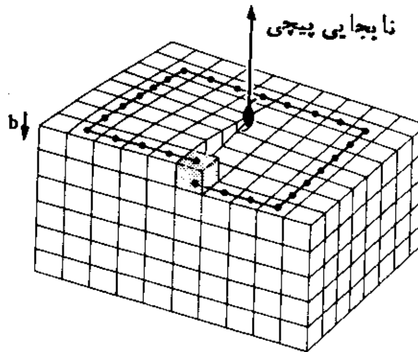
نابجایی پیچی شبیه به‌پلکان مارپیچی است‌که خط عیب آن در امتداد محورش قرار دارد (شکل ۴ــ۴ــ۴). بردار لغزش‌آن موازی با خط عیب است. تنشهای برشی به اتمهای‌مجاور نابجایی پیچی مربوط است؛ درنتیجه مانند حالت قبلی یعنی‌نابجایی‌لبه‌ای




**شکل ۴ــ۴ــ۳** انرژی نابجایی. درمجاورت نابجایی اتمها تحت فشار (تیره‌تر) و تحت‌کشش (روشنتر)، هستند.

---

* بردار برگرز نیز نامیده می‌شود *Burgers*.



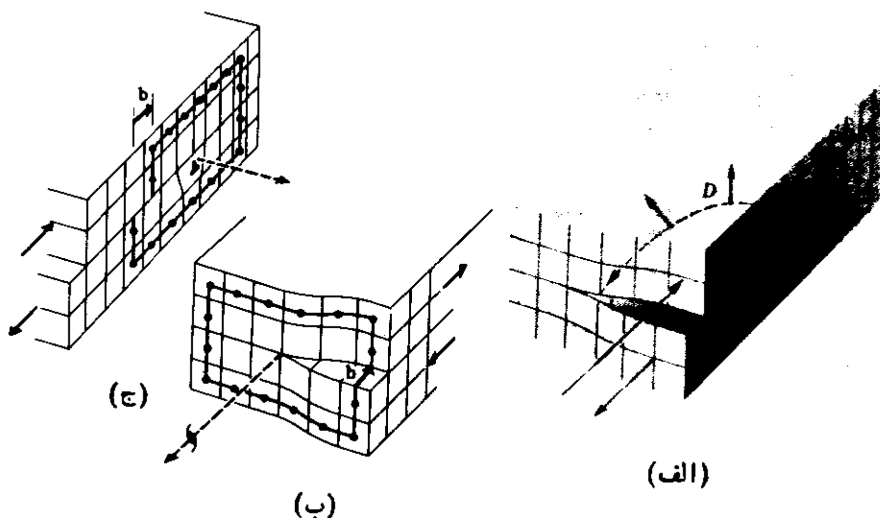

**شکل ۴-۴-۴** نـابجایی پیچی (نمایش سلول واحـد).
بردار لغزش b موازی عیب خطی است.

در اینجا نیز انرژی اضافی وجود دارد.

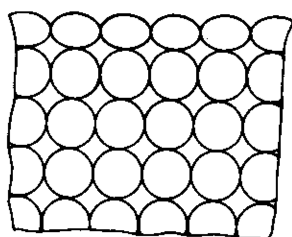
درحین تبلور هر دونوع نابجایی می‌توانند تشکیل شوند. مثلا نابجایی لبه‌ای وقتی به‌وجود می‌آیدکه درجهتگیری قسمتهای مجاور بلور درحال‌رشد عدم‌انطباق اندکی‌ایجاد شده‌باشد، به‌طوری‌کـه ردیفی اضافی از اتمها تشکیل یا حذف شود. طبق شکل ۴-۴-۴ نابجایی پیچی موجب می‌شود کـه بلور به‌آسانی رشدکند زیـرا اتمها و سلولهای واحد بیشتری می‌توانند به «پلهٔ» پیچ اضافه شوند. بنابراین استفاده از واژهٔ پیچی مناسب است، زیرا همراه با رشد بلور، پله‌ای حول محور بلور تاب می‌خورد.

نابجاییها معمولا درحین تغییرشکل به‌وجود می‌آیند. چنانکه درشکل ۴-۴-۵ دیده می‌شود، در اینجا تنش برشی باعث به‌وجود آمدن هردونابجایی، لبه‌ای و پیچی، می‌شود. درنهایت هردوی آنها جابه‌جایی یکسانی‌تولید می‌کنند و درحقیقت با خط نابجایی‌تشکیل شده به هم مربوط می‌شوند.

**سطوح.** عیوب بلوری ممکن‌است به‌صورت مرز در دوبعدگسترش یابند. آشکارترین مرز، سطح خارجی‌جسم است. اگـر چه می‌توانیم سطح را بـه‌سادگی انتهای ساختار بلوری درنظرگیریم، ولی باید سریعاً این‌حقیقت را دریافت‌که‌کوئوردیناسیون اتمها درسطح، با اتمهای درون بلور قابل مقایسه نیست. اتمهای سطحی فقط از یـك طرف همسایه دارنـد (شکل ۴-۴-۶)، بنابـراین نسبت به اتمهای درونی انرژی بیشتری دارنـد و پیوندشان سست‌تر است. این انرژی را می‌توان باکمك شکل ۲-۵-۲ (ب) تفسیرکرد، به‌این‌ترتیب که اگر اتمهای اضافی قرار بـود روی اتمهای سطحی بنشینند، در اینجا نیز، مانند مورد آمیختگی دواتم مجزا انـرژی آزاد می‌شد. بهترین دلیل مشهود، وجود انرژی سطحی در قطرات مایع‌است، این‌قطرات شکل‌کروی به‌خود می‌گیرند تا سطح خارجی بر واحد حجم (و درنتیجه انرژی سطحی) را کمینه‌کنند. جاذبهٔ سطحی‌نیز گواه دیگری بروجود اختلاف




**شکل ۴-۴-۵** تشکیل نابجایی به‌وسیلهٔ برش الف) خط نابجایی، $D'$، درمیان بلور گسترش می‌یابد تا جابه‌جایی کامل شود؛ ب) چنین عیبی نابجایی پیچی ایجاد می‌کند که خط آن موازی جهت برش است؛ ج) عیب خطی، نابجایی لبه‌ای است که خط آن عمود بر جهت برش است.




**شکل ۴-۴-۶** نمایش طرحوار اتمهای سطحی. ازآنجا که این اتمها به‌وسیلهٔ اتمهای دیگر کاملا احاطه نشده‌اند، از اتمهای درونی انرژی بیشتری دارند.

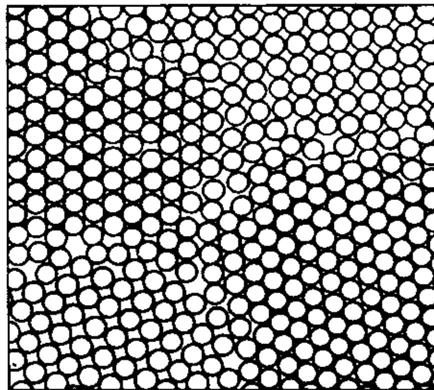
انرژی درسطح است.

**مرزدانه‌ها.** اگرچه ماده‌ای مانند مس دریك سیم الکتریکی ممکن است تنها شامل یك فاز باشد، یعنی فقط یك ساختار (fcc) داشته باشد، ولی معمولا شامل تعداد زیادی بلور با

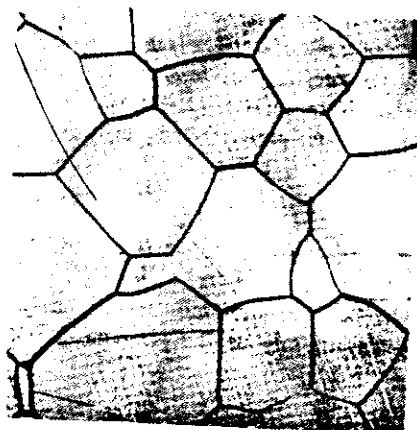
جهتگیریهای گوناگون است. هریك از این بلورهای تنها، «دانه» نامیده می‌شوند. شکل دانه درجامدات معمولا با حضور دانه‌های مجاورکنترل‌می‌شود. در درون هردانهٔ بخصوص‌تمام سلولهای واحد با یك جهتگیری و یك الگو مرتب شده‌اند. با این حال در مرزدانهٔ بین دودانهٔ مجاور ناحیهٔ انتقال وجود داردکه با هیچ‌کدام از دودانه مطابقت ندارد (شکل ۴ـ۴ـ۷).

اگرچه نمی‌توانیم هریك از اتمهایی را که درشکل ۴ـ۴ـ۷ دیده می‌شود ببینیم، ولی اگر فلز را حکاری کنیم می‌توانیم محل مرزدانه‌ها را به‌راحتی در زیر میکروسکوپ ببینیم. نخست سطح فلز باید پرداخت و صاف‌شود به‌طوری‌که صفحه‌ای با سطح آینه مانند به‌دست آید، سپس آن را برای مدت‌زمان کوتاهی درمعرض حملهٔ مواد شیمیایی قرار می‌دهیم. اتمهایی‌که در سطح انتقال بین یك دانه و دانهٔ بعدی قرار دارند بیشتر از اتمهای دیگرحل می‌شوند و خطی به‌جا می‌گذارندکه با میکروسکوپ دیده می‌شود (شکل ۴ـ۴ـ۸)؛ مرزدانهٔ حل شده برعکس بقیهٔ قسمتهای دانه به‌صورت آینهٔ کامل عمل نمی‌کند (شکل ۴ـ۴ـ۹).

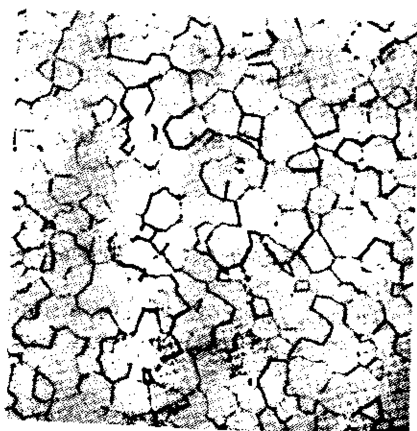
مرزدانه را می‌توان دوبعدی درنظر گرفت، گرچه ممکن است به‌شکل منحنی باشد و عملا ضخامت محدودی برابر ۲ تا ۳ فاصلهٔ اتمی داشته‌باشد. عدم انطباق‌جهتگیری‌دانه‌های مجاور باعث می‌شود که در امتداد مرز، تراکم اتمی‌کمتری به‌وجود آید. بنابراین اتمهای واقع درامتداد مرز از اتمهای درون دانه انرژی بیشتری دارند. به‌همین‌دلیل همان‌طورکه قبلا تشریح شد در امتداد مرزدانه‌ها حکاری سریعتر انجام می‌شود. انرژی بالاتر اتمهای مرزی برای جوانه‌زنی درتغییرات فازی، چندشکلی‌نیز مهم است (بخش ۳ـ۴). فشردگی اتمی‌کمتر در امتداد مرزها، نفوذ اتمی را آسانتر می‌کند (بخش ۴ـ۷)، و عدم انطباق بین دانه‌های مجاور پیشرفت حرکت نابجاییها را کاهش‌می‌دهد (شکل ۴ـ۴ـ۵). بنابراین



**شکل ۴ـ۴ـ۷** مرزدانه‌ها. به‌سطح نامنظم درمرز توجه‌کنید.

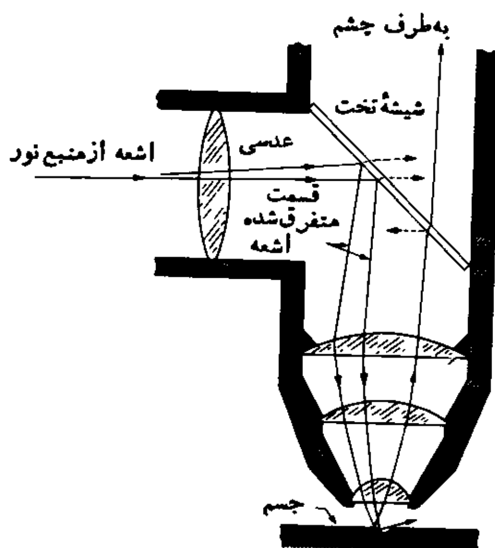


(الف)



(ب)

**شکل ۴-۴-۸** مرزدانه‌ها، الف) مولیبدن (با بزرگنمایی ۲۵۰)؛ ب) پریکلیس، MgO، با چگالی زیاد (با بزرگنمایی ۲۵۰).




**شکل ۴-۴-۹** مشاهدهٔ مرزدانه. فلز پرداخت و حکاری شده است. مرز خورده شده نور را به‌درون میکروسکوپ منعکس نخواهدکرد.

مرزدانه، کرنش پلاستیکی ماده را کاهش می‌دهد.*

* در دماهای معمولی، مرزدانه‌ها مانع لغزش می‌شوند. درنتیجه مادهٔ ریزدانه محکمتر ←

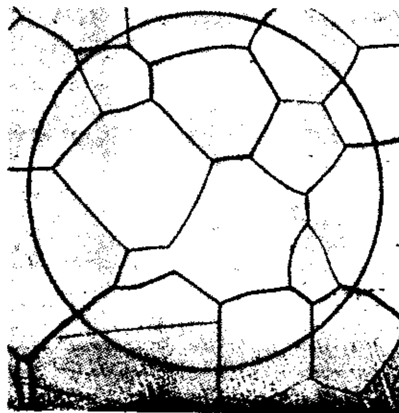
**اندازهٔ دانه و مساحت مرزدانه.** واضح است که دومیکروساختار شکل ۴-۴-۸ متفاوت‌اند. درشکل ۴-۴-۸ (الف) دانه‌ها از دانه‌های شکل ۴-۴-۸ (ب) بزرگترند. برعکس این، MgO نسبت به‌مولیبدن سطح مرزدانهٔ بیشتری دارد. (هردوبا بزرگنمایی ۲۵۰ نشان‌داده شده‌اند یعنی ابعاد خطی‌آنها ۲۵۰ مرتبه بزرگترشده است.)

ازآنجاکه مرزدانه‌ها به‌طرق‌مختلف روی ماده اثرمی‌گذارند، دانستن مقدارمساحت مرزدانه در واحد حجم، $S_V$ ، اهمیت دارد. این‌مساحت را می‌توان به‌سادگی با قراردادن خطی درعرض میکروساختار تخمین زد. البته این خط درمواد ریزدانه، مرزدانهٔ بیشتری را قطع می‌کند تا درمواد درشت دانه. رابطهٔ آن به‌این‌صورت است

$$S_V = 2P_L \qquad (۴-۴-۱)$$

که درآن $P_L$ تعداد نقاط برخورد بین خط و مرزدانه‌ها در واحد طول است.

رابطهٔ بالا را ثابت نمی‌کنیم، ولی می‌توانیم آن را درشکل ۴-۴-۱۰ نشان‌دهیم. دراین‌شکل دایره‌ای به‌قطر ۵۰ میلی‌متری‌را به‌طور تصادفی‌روی عکس‌شکل میکروسکوپی قبلی مولیبدن قرار می‌دهیم. ۱۱ محل تقاطع وجود دارد. ازآنجاکه بزرگنمایی ۲۵۰ ×



**شکل ۴-۴-۱۰** محاسبهٔ مساحت مرزدانه. ازآنجاکه بزرگنمایی ۲۵۰ است، محیط واقعی دایره برابر $\pi(50\ mm)/250$ یا $0.63\ mm$ خواهد بود. این دایره مرزدانه‌ها را در ۱۱ نقطه قطع می‌کند. درنتیجه با توجه به‌رابطهٔ (۴-۴-۱) ، مساحت مرزدانه در هر $mm^3$ معادل $2(11/0.63\ mm)$ یا $35\ mm^2$ خواهد بود.

---

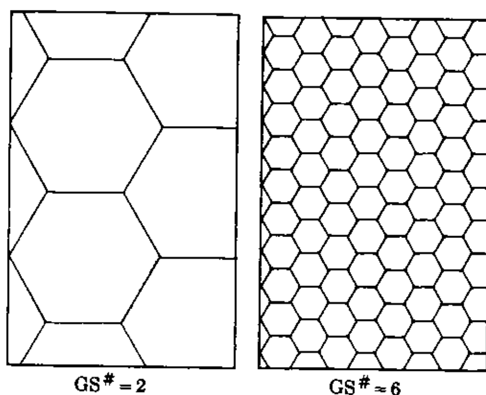
← از مادهٔ درشت دانه است. در دماهای بالا مرزدانه‌ها می‌توانند نابجاییها را همراهی کنند، درنتیجه موقعیت برعکس شده و به‌خزش منجرمی‌شود (بخش ۶-۷).

است. محیط واقــع روی فلز درحقیقت $\text{mm}$ ۰٫۰۶۳ = ۵۰ $\pi$/۲۵۰ است و مقدار $P_L$، $\text{mm}$/۱۷٫۵ = $\text{mm}$ ۰٫۰۶۳/ ۱۱ است. براساس رابطهٔ (۴ـ۴ـ۱)، سطح آن در واحد حجم، $S_V$، $\text{mm}^2/\text{mm}^3$ ۳۵ است. این را می‌توان با مساحت مرزدانه‌های MgO در شکل ۴ـ۴ـ۸ (ب)، درمثال ۴ـ۴ـ۱، مقایسه کرد.

اگر چه مرزدانه‌ها صور میکروساختارند که به‌رفتار خواص مربــوط می‌شوند ولی معمولا به‌اندازهٔ دانه استناد می‌شود. روش تعیین عدد اندازهٔ دانه توسط انجمن امریکایی آزمایش و مواد (ASTM) به‌صورت استاندارد درآمده است و گرچه‌تجربی است ولی شاخص کمی و قابل تجدید است که از ۲ عنوان پایه استفاده می‌کند

$$N_{(0.0645\,\text{mm}^2)} = 2^{n-1} \qquad (۴-۴-۲)$$

$N$ تعداد دانه‌های مشاهده شده در سطح $\text{mm}^2$ ۰٫۰۶۴۵ است.* مقدار $n$ عدد اندازهٔ دانه (G. S. #) است. مثال ۴ـ۴ـ۲ مقدار G. S. # را برای‌مولیبدن، که درشکل ۴ـ۴ـ۸ (الف) دیده می‌شود، محاسبه می‌کند. شکل ۴ـ۴ـ۱۱ دومجموعه ازشبکهٔ اندازهٔ دانه‌ها را نشان می‌دهد کــه می‌توان ازآنها بــرای تعیین سریــع چشمی عــدد اندازهٔ دانهٔ عکس زیرمیکروسکوپ با بزرگنمایی ۱۰۰ استفاده‌کرد. این‌اعداد اندازهٔ دانه به‌عملیات گرمایی فولادها (بخش ۱۱ـ۶) و دمای انتقال فولادها (بخش ۶ـ۸) مربوط می‌شود.




**شکل ۴ـ۴ـ۱۱** عدد اندازهٔ دانه (ASTM). عدد بزرگ اندازهٔ دانــه G. S. # (رابطهٔ ۴ـ۴ـ۲). بیانگردانه‌های بیشتر و مساحت مرزدانهٔ زیادتر در واحد حجم است. (۱۰۰ ×)

---

* این سطح برابر $1\,\text{in}^2$ با بزرگنمایی ۱۰۰ × است. این روش با استفاده ازمیکروسکوپی بــا عــدسی ۱۰۰ × استانــدارد شده است و بــا شمــارش دانــه‌هــای مــوجــود در سطح 1 in × 1 in ($1\,\text{in}^2$ ۰٫۰۰۰۱) انجام می‌شود.

**مثال ۴-۴-۱** سطح مرزدانه‌های MgO شکل ۴-۴-۸ (ب) را درواحد حجم تخمین بزنید.

حل: خطی به‌طول ۵۰ mm به‌طور تصادفی روی شکل قراردهید و محل تقاطع آن را با مرزدانه‌ها بشمارید. اگر با ۵ مرتبه تکرار این‌عمل اعداد ۱۳، ۱۷، ۱۲، ۱۴، و ۱۲ را به‌دست‌آورده‌اید در ۲۵۰ mm عدد به‌دست‌آمده خواهد بود. ولی بزرگنمایی ×۲۵۰ است بنابراین ۶۸/mm خواهد بود.

$$S_V = ۲(۶۸/\text{mm}) = \sim ۱۴۰/\text{mm} \quad (\text{یا } ۱۴۰\ \text{mm}^۲/\text{mm}^۳)$$

توضیح. برای MgO شکل ۴-۴-۸ سطح مرزدانه در واحد حجم چهار برابر مولیبدن است. هردوعدد به‌طور تخمینی به‌دست‌آمده‌اند. ولی با دقت‌کافی‌می‌توان جوابی با ۱۰٪± دقت به‌دست‌آورد که در بیشترموارد کافی است. ▲

**مثال ۴-۴-۲** مقدار ASTM G.S. # را برای مولیبدن شکل ۴-۴-۸ (الف) معین کنید.

حل: سطح این شکل بزرگ شده $(۵۹\ \text{mm})^۲$ است

$$\text{سطح واقعی} = \left(\frac{۵۹\ \text{mm}}{۲۵۰}\right)^۲ = ۰{,}۰۵۶\ \text{mm}^۲$$

دراین سطح تقریباً ۱۷ دانه وجود دارد. (به‌توضیح توجه‌کنید.)

$$\frac{\sim ۱۷}{۰{,}۰۵۶\ \text{mm}^۲} = \frac{N}{۰{,}۰۶۴۵\ \text{mm}^۲}$$

$$N = \sim ۲۰ = ۲^{n-۱}$$

$$n = ۵^+$$

توضیح. عکس شکل میکروسکوپی شکل ۴-۴-۸ خود نمونه‌ای است و بنابراین دستخوش تغییرات آماری است. درنتیجه نباید دقت زیادی از آن انتظار داشته باشیم. علاوه‌براین خیلی‌کم پیش می‌آیدکه درتخمین عدد اندازهٔ دانه دقتی بیش از ۰٫۵± لازم باشد.

تعداد دانه‌ها درسطحی‌که به‌صورت نمونه ارائه شده‌است به‌سادگی با مراحل‌زیر به‌دست‌می‌آید: (۱) شمارش‌دانه‌هایی‌که درون سطح وجود دارد؛ (۲) افزودن نصف‌تعداد دانه‌هایی‌که روی لبه قراردارند، به‌مقدار شمارش‌شده (زیرا با سطوح مجاور مشترکند.)؛ و (۳) سپس افزودن یك چهارم هریك از چهار دانهٔ موجود درگوشه‌ها. اگر نمونهٔ دیگری

از فلز را درشکل ۴-۴-۸ (الف) درنظر بگیرید و شمارش حداقل ۱۵ وحداکثر ۲۰ باشد عدد اندازهٔ دانه هنوز $n = 5^+$ خواهد بود. برای آنکه عدد اندازهٔ دانــه یکی بیشترشود شمارش باید دوبرابرشود. ▲

**مثال ۴-۴-۳** اندازه‌گیری بسیاردقیقی (تا چهار رقم با معنی) ازچگالی آلومینیم به‌عمل آمده است. اگــر فلز سریعاً از ۶۵۰°C سرد شود، $\rho = ۲٫۶۹۸\ \text{Mg/m}^۳$ می‌شود. این مقدار را با چگالی تئوری کــه از راه تجزیه به‌وسیلهٔ تفرق به‌دست‌آمده و در آن مقدار $a$ برابر ۰٫۴۰۴۹ nm تعیین شده است، مقایسه‌کنید.

حل: ازآنجا که وزن اتمی آلومینیم ۲۶٫۹۸ واحد جرم اتمی و ساختار آن fcc است.

$$\rho_{\text{تئوری}} = \frac{۴(۲۶٫۹۸\,\text{amu})/(۰٫۶۰۲۲ \times ۱۰^{۲۴}\,\text{amu/g})}{(۰٫۴۰۴۹ \times ۱۰^{-۹}\,\text{m})^۳} = ۲٫۷۰۰\,\text{Mg/m}^۳$$

$$\frac{\rho}{\rho_{\text{تئوری}}} = \frac{۲٫۶۹۸}{۲٫۷۰۰} = ۰٫۹۹۹$$

یا تقریباً ۱ تهیجای درمقابل هر ۱۰۰۰ اتم وجود دارد.

توضیح. اندازه‌هــا نزدیك بهم‌اند. آلومینیم مــانند بیشتر فلزات درست زیرنقطهٔ ذوب خود به‌ازای هر $۱۰^۳$ اتم ۱ تهیجای دارد. درقسمتهایی که تعادل وجود دارد درنصف دمای مطلق ذوب این مقدار به ۱ تهیجای به‌ازای هر $۱۰^۷$ اتم می‌رسد. ▲

## ۴-۵ مواد غیربلوری

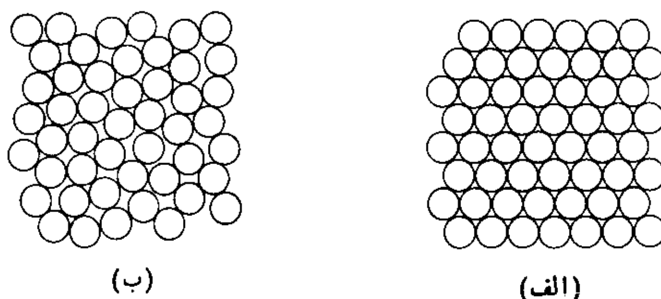
در بعضی از مواد مهم مهندسی و علمی نظم پردامنه وجود ندارد. این شامل تمام مایعات، شیشه، اکثر پلاستیکها، و تعداد کمی از فلزات می‌شود، به‌شرط آنکه این فلزات از حالت مذاب فوق‌العاده سریع‌سرد شوند. در اصل می‌توانیم این‌عدم تکرار ساختار را به‌صورت بی‌نظمی حجمی یا سه‌بعدی، و به‌عنوان پیامد عیوب نقطه‌ای، عیوب خطی، و مرزدانه‌های دوبعدی تصویر کنیم. این مواد را درمقایسه با مواد بلوری، بی‌شکل می‌نامیم.

**مایعات.** در بیشترموارد مایعات سیال‌اند (یعنی تحت اثرجرم خود جریان می‌یابند). ولی همچنان‌که شیرهٔ قند در دی‌ماه نیمه‌صلب می‌شود، مایعات گوناگون مهم صنعتی‌نیز بدون‌اینکه متبلور شوند، می‌توانند بسیار ویسکوز و حتی جامد شوند.

نخست به‌بی‌نظمی به‌وجودآمده درفلز یك‌جزئی، هنگام نزدیك‌شدن به‌نقطهٔ ذوب‌فلز و تبدیل‌آن به‌حالت مایع نظری می‌افکنیم. برای مثال می‌توانیم آلومینیم را مورد بررسی

قرار دهیم. همان‌طورکه دربخش قبل گفته شد، انرژی گرمایی بیشتر در دمای بالاتر نه تنها باعث به‌وجودآمدن ارتعاشات گرمایی بیشترمی‌شود، بلکه تعدادی تهیجای نیزتولیدمی‌کند. آلومینیم متبلور در اندکی کمتر از نقطهٔ ذوب می‌تواند تا حدود ۰٫۱٪ تهیجای درشبکهٔ خود داشته باشد. اگر تعداد تهیجایها درساختار فشرده به‌حدود ۱٪ برسد،«آشوب حکمفرما می‌شود». عددکوئوردیناسیون ۱۲ همیشگی برهم می‌خورد و نظم پردامنهٔ ساختار بلوری از بین می‌رود (شکل ۴-۵-۱).

این بی‌نظمی حاصل از ذوب، حجم بسیاری از مواد را افزایش می‌دهد.* (شکل ۴-۵-۲). با این بی‌نظمی، تعداد همسایگان نزدیك هراتم از ۱۲ به ۱۱ یا ۱۰ تنزل پیدا می‌کند، با این‌حال دراین‌مورد الگوی معینی وجود ندارد، بنابراین فضای مربوط به‌هراتم و فاصلهٔ متوسط بین اتمی چند درصد اضافه می‌شود. هرماده‌ای برای ذوب شدن به‌مقدار مشخصی انرژی احتیاج دارد. این انرژی را گرمای ذوب می‌نامیم. ازآنجاکه گرمای ذوب ($\Delta H_f$) انرژی لازم برای ایجاد بی‌نظمی دریك مول از اتمهای‌ماده، و دمای ذوب ($T_m$) مقیاسی برای اندازه‌گیری استحکام پیوند اتمی است؛ رابطه‌ای کلی بین این‌دو به‌دست می‌آید (جدول ۴-۵-۱).*

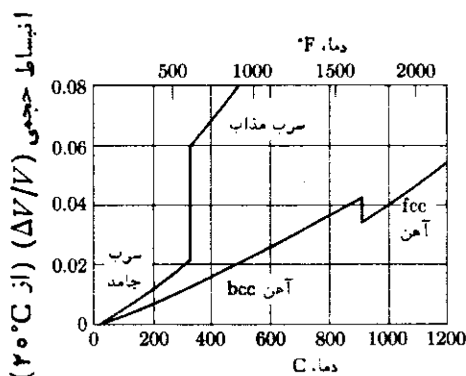


(ب) (الف)

**شکل ۴-۵-۱** مذاب (فلز). الف) فلز متبلور با CN=۱۲ (۶ اتم درصفحه به‌علاوهٔ ۳ اتم بالا و ۳ اتم پایین)؛ ب) فلز مایع، نظم پردامنه ازبین‌رفته است؛ CN < ۱۲ و فاصلهٔ متوسط بین اتمی اندکی افزایش یافته است.

* این افزایش حجم درمورد تمام موادی است‌که ساختار فشرده داشته و پیوندهای جهتدار نداشته باشند. تعداد اندکی ازمواد با ضریب فشردگی‌کم و پیوندهای فضاویژه (فصل دوم) وقتی دراثرگرما برانگیخته شوند به‌صورت ساختارهای متراکمتر فرو می‌ریزند. آب مهمترین ماده دربین این استثناهاست.

* برای‌آنکه همبستگی خوبی برقرار باشد باید مواد مشابهی را مثلا در بین فلزات، در نظر بگیریم.




**شکل ۴-۵-۲** تغییرات حجم، (براساس حجم در ۲۰°C). الف) سرب با تقریباً ۴ درصد حجمی انبساط از حالت fcc به حالت مذاب؛ ب) در ۹۱۲°C آهن bcc به fcc تبدیل می‌شود و تغییرحجم می‌یابد (مثال ۳-۴-۱).

**شیشه‌ها.** همان‌طورکه قبلا نشان داده شد، شیشه‌ها را به‌عنوان جامدات بسیار ویسکوز در نظرمی‌گیرند، زیرا غیربلوری‌اند. با این‌حال عملا فقط تعدادکمی از مایعات می‌توانند به‌صورت شیشه درآیند. درنتیجه برای‌اینکه بتوانیم وجه‌تمایزی قائل‌شویم، باید به‌ساختار شیشه نظر دقیقتری بیفکنیم.

در دماهای بالا شیشه‌ها مایعات حقیقی تشکیل می‌دهند. اتمها می‌توانند آزادانه در اطراف حرکت‌کنند و به‌تنشهای برشی پاسخ دهند. اگرشیشهٔ تجارتی در دمای مربوط به‌حالت مایع خود فوق سرد شود، انقباض گرمایی ناشی‌از نوآرایی‌اتمها به‌وجود می‌آید که موجب فشردگی مؤثرتر اتمها می‌شود. این انقباض درتمام فازهای مایع عمومیت‌دارد (شکل۴-۵-۳). با این‌حال با سردکردن بیشتر، درضریب انبساط شیشه‌ها تغییری‌ناگهانی رخ می‌دهد. زیر دمای مشخصی که دمای انتقال‌شیشه‌ای یا به‌عبارتی ساده‌تر دمای شیشه‌ای، $T_g$، نام‌دارد. نوآرایی‌اتمها دیگر اتفاق‌نمی‌افتد وانقباض، تنها درنتیجهٔ ارتعاشات گرمایی کوچکتر رخ می‌دهد. این ضریب انبساط گرمایی پایینتر را می‌توان با ضریب گرمایی در بلورها، مقایسه‌کردکه درآن ارتعاشات گرمایی‌تنها عامل‌ایجادکنندهٔ انقباض‌است ونوآرایی اتمها به‌وجود نمی‌آید.

لغت شیشه به‌موادی گفته می‌شود که مشخصات انبساطی آنها شبیه به‌شکل ۴-۵-۳ باشد. شیشه‌ها ممکن‌است غیرآلی و یا آلی باشند و با نظم‌کم دامنه (نداشتن‌نظم پردامنه) مشخص می‌شوند. شکل ۴-۵-۴ نشاندهندهٔ یکی از ساده‌ترین شیشه‌ها ($B_2O_3$) است، که درآن هر اتم‌کوچك بور درمیان ۳ اتم بزرگتر اکسیژن جا می‌گیرد. ازآنجا که بور سه ظرفیتی و اکسیژن دوظرفیتی است، اگرهراتم اکسیژن بین‌دواتم‌بور قرارگیرد توازن

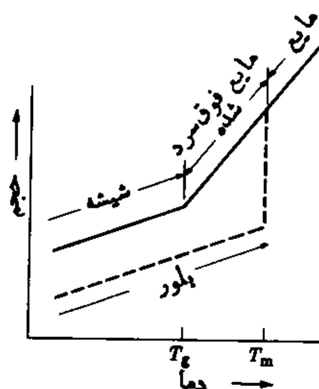
**جدول ۴-۵-۱** گرمای ذوب فلزات

| فلز | دمای ذوب °C(°F) | گرمای ذوب ژول برمول* |
|---|---|---|
| تنگستن، W | ۳۳۸۴(۶۱۲۹) | ۳۲۰۰۰ |
| مولیبدن، Mo | ۲۶۲۳(۴۷۵۳) | ۲۸۰۰۰ |
| کرم، Cr | ۱۸۶۳(۳۳۸۵) | ۲۱۰۰۰ |
| تیتانیم، Ti | ۱۶۷۲(۳۰۴۲) | ۲۱۰۰۰ |
| آهن، Fe | ۱۵۳۸(۲۸۰۰) | ۱۵۳۰۰ |
| نیکل، Ni | ۱۴۵۵(۲۶۵۱) | ۱۷۹۰۰ |
| مس، Cu | ۱۰۸۴(۱۹۸۴) | ۱۳۵۰۰ |
| آلومینیم، Al | ۶۶۰(۱۲۲۱) | ۱۰۵۰۰ |
| منیزیم، Mg | ۶۴۹(۱۲۰۰) | ۹۰۰۰ |
| روی، Zn | ۴۱۹(۷۸۷) | ۶۶۰۰ |
| سرب، Pb | ۳۲۷(۶۲۱) | ۵۴۰۰ |
| جیوه، Hg | −۳۸٫۹(−۳۸) | ۲۳۴۰ |

* ژول بر $10^{24} \times$ ۶٫۰ اتم؛ 1cal = ۴٫۱۸J.

الکتریکی محفوظ می‌ماند. درنتیجه‌ساختار پیوسته‌ای از اتمهایی که محکم به‌یکدیگر پیوند یافته‌اند به‌وجود می‌آید. زیر دمای انتقال شیشه‌ای که اتمها نمی‌توانند نوآرایی یابند، مشخصات سیالیت از بین می‌رود و جامد غیربلوری تشکیل می‌شود. چنین جامدی مقاومت قابل‌توجهی درمقابل تنشهای برشی دارد و در نتیجه نمی‌تواند مایعی حقیقی به‌حساب آید.

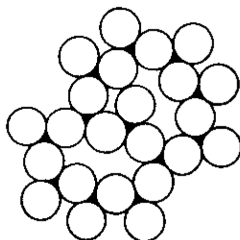
مشخصات دما-حجم شکل ۴-۵-۳ نخستین بار درشیشه‌های سیلیکاتی مشاهده شد (بخش ۸-۵). با این‌حال خیلی‌زود آشکارشدکه این‌مشخصات درمواد پلی‌مری نیز اهمیت بسزایی دارد. بنابراین درفصل هفتم، دمای انتقال شیشه‌ای ($T_g$) را به‌دقت بررسی‌خواهیم کرد. زیردمای $T_g$ پلی‌مرها سخت و شکننده‌اند، و ثابت دی‌الکتریك پایینی دارند. بالای




**شکل ۴-۵-۳** تغییرات حجمی در مایعات فوق سردشده و شیشه‌ها. وقتی مایعی سرد می‌شود. سریع و به‌طور مداوم منقبض می‌شود زیرا بـا کاهش ارتعاشات گرمایی، اتمها آرایشی با فشردگی مؤثرتر می‌یـابند. درصورت غیربلوری بودن، انقباض زیر $T_m$ تا دمای انتقال شیشه‌ای، $T_g$ که در آن ماده به‌صورت شیشهٔ صلب درمی‌آید، ادامه می‌یابد. زیر $T_g$ نوآرایی پدید نمی‌آید و تنها انقباض به‌وجود آمده به‌علت ارتعاشات گرمایی اتمها در مکان استقرار آنها صورت می‌گیرد.

$T_g$، پلاستیکها خمش‌پـذیر و حتی لاستیکی می‌شونـد و تغییرات همرسی نیز در ثـابت دی‌الکتریک آنها ایجاد می‌شود.

**فازها.** قبلا درمورد فازها بحث کردیم. در طول این کتاب چندبار دیگر نیز درموردآنها



**شکل ۴-۵-۴** ساختار شیشهٔ $B_2O_3$. اگرچه نظم بردامنهٔ بلوری درآن وجود ندارد. ترتیب کم‌دامنه‌ای موجود است. هراتم بور بین سه اتم اکسیژن قراردارد، هراتم اکسیژن با دواتم بور کوئوردینانس شده است.

بحث خواهیم کرد. در اینجا می‌توانیم فازها را به‌صورت قسمتی از ماده که به‌وسیلهٔ ساختار یا ترکیب، از دیگر قسمتها متمایز می‌شوند، تعریف کنیم. «یخ-آب» را درنظر بگیرید با وجود آنکه ترکیب یکسان است، یخ جامدی بلوری با شبکهٔ منشور شش‌بر است، درحالی که آب مایع است. مرز فاز بین آن دو، درساختار، ناپیوستگی‌ایجاد می‌کند، بنابراین آنها دو فاز مجزایند. یا مس با روکش نقره را درنظر بگیرید. مس و نقره هر دو fcc هستند؛ با این‌حال اتمهای نقره به‌اندازهٔ کافی بزرگتر از اتمهای مس‌انـد*، به‌طوری که در دمای اتاق تقریباً ناپیوستگی کاملی در ترکیب وجود دارد. بنابراین دو فاز جداگانه را تشکیل می‌دهند.

معمولاً دوفاز هـرماده هم درترکیب و هم درساختار تفاوتهای آشکاری دارند، مثلاً پلاستیکی که با الیاف شیشه‌ای تقویت شده باشد. درمقابل بعضی ازفازها وجه تمایز خود را از دست می‌دهند و دریکدیگرحل می‌شوند، مثلاً بعد از اینکه شکر درقهوه حل‌شد دیگر فاز مجزایی نیست. همین‌امر درمورد روی نیز صادق است. روی hcp است ولی هنگام تولید برنج، درمس (fcc) حل می‌شود و محلول جامد تک‌فازی به‌وجود می‌آورد.

براساس بحث بالا، محلول (مایع یا جامد) فازی است که بیش از یك جزء دارد و مخلوط، ماده‌ای با بیش از یك فاز است.

فازهای بلوری زیادی وجود دارند زیرا جایگشتها و ترکیبات بیشماری از اتمها، یا گروههای اتمی وجود دارد. تعداد فازهای بی‌شکل نسبتاً کم است زیرا عدم وجود نظم پردامنه باعث می‌شودکه آرایش اتمی محدودیت‌کمتری داشته‌باشد و درمقایسه با بلورها، گسترهٔ وسیعتری برای ایجاد محلول وجود داشته بـاشد.** تنها یك فازگازی وجود دارد. اتمها یا ملکولهای‌گاز از یکدیگر دورند و به‌طورتصادفی توزیع‌شده‌اند، درنتیجه اجزای بخارگونهٔ دیگری نیزمی‌توانند به «ساختار» اضافه‌شوند. بجز درسطح اتمی یا مولکولی، ناپیوستگی دیگری در گازها مشاهده نمی‌شود.

**مثال ۴-۵-۱** به‌کمك شکل ۴-۵-۲ ضریب فشردگی را بـرای الف) سرب جـامد در ۳۲۶°C؛ و ب) سرب مایع در ۳۲۸°C، محاسبه‌کنید. (فرض‌کنید شعاع گلولـهٔ سخت ۰٫۱۷۵۰ nm باقی‌بماند.)

حـل: سرب ساختار fcc دارد و ضـریب فشردگی (PF) اتمی‌آن ۰٫۷۴ است (مثال ۳-۲-۱ (الف) را ببینید)؛ بنابـراین افـزایش حجم ۱٫۲٪ در ۳۲۶C و ۶٪ در ۳۲۸°C به‌همان نسبت ضریب فشردگی را کاهش می‌دهد.

---

* $R_{Ag}$=۰٫۱۴۴۴nm و $R_{Cu}$=۰٫۱۲۷۸nm.

** الیاف شیشه‌ای و پلاستیکی که ذکر آن رفت هردو بی‌شکل‌اند. درحالی‌که ساختارآنها برای ایجاد یك فاز به‌اندازهٔ کافی شبیه یکدیگرنیست، هرکدام می‌توانند به‌عنوان حلال مقدارزیادی از اجسام حل شدنی دیگرعمل کنند.

الف) $PF_{326°C}=\frac{0.74}{1.021}=0.725$

ب) $PF_{328°C}=\frac{0.74}{1.06}=0.698$

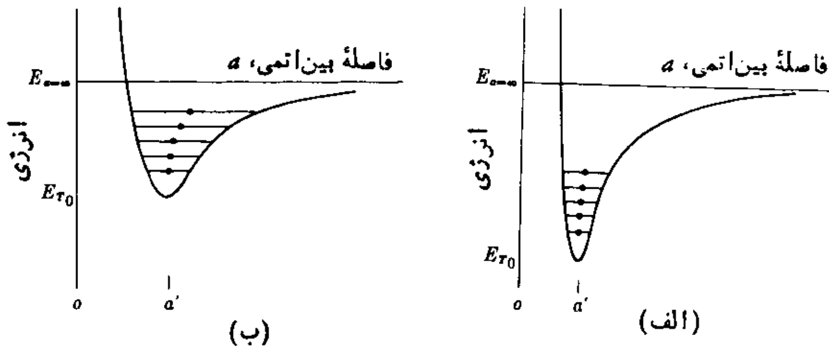
توضیح. می‌توان گفت که شعاع با افزایش‌طولی ۷ر۰ درصد از ۱۷۵۰ر۰ nm در ۲۰°C ، به ۱۷۶۲ر۰ nm در ۳۲۶°C می‌رسد تا انبساط حجمی ۱ر۲ درصد در آن به‌وجود آید، اگر چنین باشد ضریب فشردگی در ۳۲۶°C نیز همان ۷۴ر۰ باقی خواهد ماند و ضریب فشردگی مایع ۷۱۳ر۰ می‌شود. نمی‌توان با این‌نظرمخالفت کرد، زیرا یکی از تعاریف شعاع، نصف نزدیکترین فاصلهٔ بین اتمی است. در هرصورت در دمای ذوب، درفشردگی مؤثر یك ناپیوستگی ناگهانی وجود دارد. ▲

## ۴ـ۶ ارتعاشات اتمی

اتمهای یك ماده فقط در 0K (−۲۷۳°C یا −۴۶۰°F) ساکن می‌شوند. تحت این شرایط اتمها درمیان همسایه‌های خود در پایینترین سطح انرژی قرار می‌گیرند، [شکل ۲ـ۵ـ۲ (ب)] ، با افزایش‌دما، افزایش‌انرژی، نوسان‌اتمها را درفواصل بین‌اتمی‌بزرگتر وکوچکتر ممکن می‌سازد. با این‌حال همان‌طورکه از چاه انرژی شکلی که قبلا ارائه شد، می‌توان توجیه‌کرد، جابه‌جاییها دردوجهت متقارن نیستند، یعنی برای‌سطح انرژی مشخص (دمای معین) ، اتمها بیش ازآنکه بتوانند به‌طرف یکدیگر کشیده شوند، از یکدیگر دور می‌شوند. این‌امرموجب به‌وجودآمدن انبساط گرمایی می‌شود زیرا میانگین فاصلهٔ بین‌اتمی افزایش می‌یابد.

حتی در دمای معین همهٔ اتمها یا مولکولها در هر لحظهٔ بخصوص انرژی یکسانی ندارند. بلکه طیفی از انرژی بین اتمها وجود داردکه از تقریباً صفر تا مقادیرخیلی بالا گسترده شده است. البته انرژی اکثر اتمها نزدیك به‌میانگین است. از طرف دیگر، در یك دوره از زمان، هر اتم معین‌گستره‌ای از انرژی را که از تقریباً صفر تا مقادیر خیلی بالا امتداد دارد، تجربه خواهد کرد. با این‌حال در بیشتر موارد، انرژی اتم درحدود مقدار میانگین خواهد بود. برای برآورد احتمال اینکه اتم انرژی‌کافی برای‌شکستن پیوند خود داشته باشد و بتواند به‌محلهای جدید انتقال یابد، باید به‌طیف انرژی نظری بیفکنیم. این فرایندی است که آن را نفوذ می‌نامیم.

**انبساط گرمایی.** درنزدیکی دمای‌محیط، ظرفیت‌گرمایی بسیاری از جامدات اساساً ثابت است. درنتیجه می‌توان فواصل مساوی و متوالی دما را روی درهٔ انرژی [شکل ۴ـ۶ـ۱ (الف)] معین‌کرد. با افزایش متوالی انرژی، فاصله بین اتمی میانه نیز افزایش می‌یابد؛



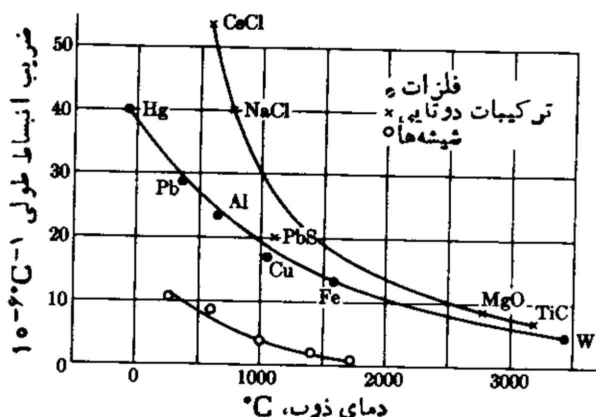

**شکل ۴ـ۶ـ۱** انرژی و انبساط. الف) جامدی با پیوند قوی؛ (ب) جامدی با پیوند ضعیف. با افزایش انرژی گرمایی یکسان بالای دمای صفرمطلق، $T_0$، در ماده‌ای که درهٔ انرژی عمیقتری دارد میانگین فاصله بین اتمی کمتر تغییر خواهد کرد (به‌شکل ۲ـ۵ـ۲ (ب) مراجعه کنید). انبساط در دماهای بالاتر (انرژی بیشتر) مشخصتر می‌شود.

بنابراین انبساط گرمایی که قبلا از آن سخن گفتیم، رخ می‌دهد. به هر دو تصویر دقت کنید، درماده‌ای با پیوند پراستحکام (نقطهٔ ذوب بالا) که با درهٔ انرژی عمیق مشخص می‌شود، به‌ازای $\Delta T$، تغییرات ابعادی کمتری نسبت به‌ماده‌ای با پیوند ضعیف، ایجاد می‌شود [شکل ۴ـ۶ـ۱ (ب)]. این‌امر درشکل ۴ـ۶ـ۲ دیده می‌شود، که نموداری از داده‌های بخش خلاصهٔ مطالب فصل دوم است. شکل ۴ـ۶ـ۲ براین نکته تأکید دارد که تعمیمها به‌مواد مشابه محدود می‌شوند.

تصویر دوم شکل ۴ـ۶ـ۱ گویای این نکته است که با افزایش‌دما، تغییرابعاد نسبتاً مشخصتر می‌شود. منحنیهای مقدار میانه درشکل ۴ـ۶ـ۱ به‌راست خم می‌شوند. این نکته داده‌های شکل ۱ـ۳ـ۱ را تشریح می‌کند که در آن ضریب انبساط گرمایی مس و آهن با دما افزایش می‌یافت.

انبساط گرمایی فقط درمواد مکعبی و بی‌شکل، همسو است. در بلورهای دیگر مقدار انبساط باجهت تغییر می‌کند. مثلا گرافیت (شکل ۲ـ۲ـ۶) را در نظر بگیرید، ساختار آن مشخصاً چندسو است در نتیجه، تغییرات گرمایی شبکه‌را درجهت عمودی بیشتر از دوجهت افقی منبسط می‌کند.*

* مثلا در $700^\circ C$، ضریب انبساط گرمایی گرافیت روی صفحهٔ لایه‌ها فقط $0.8\times10^{-6}/^\circ C$ است، ولی درجهت عمود برلایه‌ها این مقدار به $29\times10^{-6}/^\circ C$ می‌رسد. هردومقدار ذکرشده در دمای پایینتر کاهش می‌یابند، و درحقیقت ضریب اولی در $400^\circ C$ ازصفر عبورخواهد کرد و در دمای اطاق اندکی منفی خواهد شد. مقداردوم (عمودبرلایه‌ها) در $20^\circ C$ برابر $26\times10^{-6}/^\circ C$ می‌شود، به‌طوری که کلا ضریب انبساط گرمایی حجمی $\alpha_V \simeq \alpha_x+\alpha_y+\alpha_z$ مثبت خواهد شد (مثال ۴ـ۶ـ۱ را ببینید).




**شکل ۴-۶-۲** دمای ذوب برحسب ضریب انبساط گرمایی (۲۰°C). هرچه مواد پیوند محکمتر و نقطهٔ ذوب بالاتری داشته باشند، ضریب انبساط گرمایی آنها کمتر است (با شکل ۴-۶-۱ مقایسه کنید). مقایسه باید بین مواد مشابه صورت گیرد.

این‌امر تعجب‌آور نیست زیرا پیوندهای بین لایه‌ها ضعیفتر از پیوندهای درون لایه‌هایند.

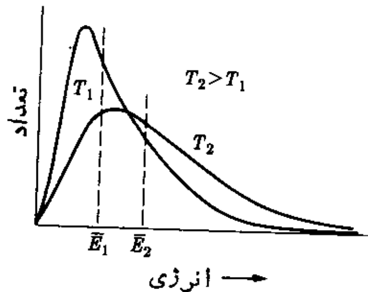
**توزیع انرژی گرمایی.** با افزایش‌دما، $T$، انرژی‌جنبشی کل، (K.E)، یک‌مول گاز افزایش می‌یابد. به‌طوری که رابطهٔ زیرصادق است

$$\text{K.E.} = \frac{۳}{۲} RT \qquad (۴-۶-۱)$$

دراین رابطه، $R$ همان ثابت گازهاست که درشیمی مقدماتی دربارهٔ آن بحث می‌شود و با توجه به‌واحدهای آن به‌صورت ۱٫۹۸۷ cal/mole . K ارائه می‌شود. اگر واحد ژول را درسیستم SI درنظر بگیریم و به‌جای مول (یا $۶٫۰۲ \times ۱۰^{۲۴}$) به یکایك اتمها و مولکولها توجه‌کنیم، این ثابت به مقدار $۱۳٫۸ \times ۱۰^{۲۴}$ J/K تبدیل خواهد شد. این مقدار ثابت بولتسمان نامیده می‌شود و به‌صورت $k$ نشان داده می‌شود. بنابراین میانگین K.E. تك‌مولکول گاز از رابطهٔ زیر پیدا می‌شود

$$\text{K.E.} = \frac{۳}{۲} kT \qquad (۴-۶-۲)$$

با این‌حال همان‌طورکه در پاراگراف دوم این بخش بحث شد، نمی‌توان گفت که تمام مولکولهای هوا در این اتاق انرژی مساوی دارند، بلکه توزیع آماری انرژی مطابق با شکل ۴-۶-۳ وجود خواهد داشت. درهر لحظهٔ بخصوص، انرژی تعدادکمی ازمولکولها

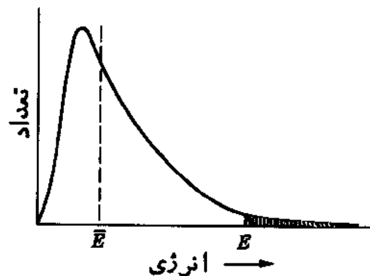



**شکل ۴ـ۶ـ۳** توزیع انرژی. با افزایش دما، $T$، هم انرژی‌میانگین $\bar{E}$ و هم تعداد آنهایی‌که بیشتر از حد معینی انرژی دارند افزایش می‌یابد.

نزدیك به صفر است، انرژی بسیاری ازآنها نزدیك به مقدار میانگین است، و بعضی از مولکولها انرژی فوق‌العاده زیادی خواهند داشت. با افزایش دما: ۱) انرژی‌میانگین مولکولها افزایش خواهد یافت؛ و ۲) تعداد مولکولهایی‌که بیشتر از حد معینی انرژی دارند زیاد می‌شود.

روابط بالا درمورد توزیع انرژی جنبشی مولکولهای‌گاز صادق است. با این‌حال همین اصول درمورد توزیع انرژی ارتعاشی‌اتمها درمایعات و جامدات نیز صحیح است. به‌ویژه درهرلحظهٔ بخصوص، تعداد قابل اغماضی از اتمها دارای انرژی صفر، بسیاری از اتمها دارای انرژی نزدیك به انرژی میانگین و بعضی از اتمها دارای انرژیهای فوق‌العاده زیادند.

توجه ما به اتمهایی‌که انرژی بالایی دارند معطوف خواهد شد. اغلب می‌خواهیم بدانیم احتمال اینکه انرژی اتمها بیشتر از حد معینی باشد چقدر است، یعنی چه‌کسری از اتمها دارای‌انرژی‌بیشتراز $E$ درشکل۴ـ۶ـ۴ هستند. راه‌حل‌آماری این مسئله را بولتسمان




**شکل ۴ـ۶ـ۴** انرژیها به نسبت تعداد اتمهایی‌که انرژی بالا دارند (سایه‌زده شده) به‌تعداد کل اتمها، تابعی نمایی از $(-E/kT)$ است، به‌شرط آنکه $E \gg \bar{E}$ (رابطهٔ ۴ـ۶ـ۳، ب).

بدین‌صورت ارائه کرده است

$$\frac{n}{N_{\text{کل}}} \propto e^{-(E-\bar{E})/kT} \qquad \text{(۴-۶-۳، الف)}$$

در این رابطه $k$ ثابت بولتسمان است که قبلا تشریح شد. تعداد اتمهایی‌که انرژی آنها بیشتر از $E$ است، $n$، به‌تعداد کل اتمهای موجود $N_{\text{کل}}$، تابعی از دمای $T$ است. این‌رابطه وقتی صادق است‌که $E$ به‌طور قابل ملاحظه‌ای بزرگتر از انرژی‌میانگین $\bar{E}$ باشد، دراین حالت رابطه به‌این‌صورت درمی‌آید

$$\frac{n}{N_{\text{کل}}} = Me^{-E/kT} \qquad \text{(۴-۶-۳، ب)}$$

که در آن $M$ ثابت تناسب است. مقدار $E$ معمولا برحسب ژول براتم بیان می‌شود. پس، $k$ برابر $۱۳٫۸ \times ۱۰^{-۲۴}$ J/atom است. ولی تبدیل واحدها را می‌توان با استفاده از پیوست (الف) انجام داد.

**مثال ۴-۶-۱** در $۷۰۰°C$ ضریب انبساط خطی، $\alpha$، برای گرافیت به‌صورت زیر است

$$\alpha_{\perp} = ۲۹ \times ۱۰^{-۶}/°C$$

$$\alpha_{||} = \alpha_{||} = ۰٫۸ \times ۱۰^{-۶}/°C$$

دراینجا $\alpha_{\perp}$ ضریب انبساط درجهت‌عمود برلایه‌های‌گرافیت شکل ۲-۲-۶ و $\alpha_{||}$ ضریب انبساط دردوجهت دیگر موازی لایه‌هاست. افزایش‌حجم گرافیت بین $۶۰۰°C$ و $۸۰۰°C$ چقدر است؟

حل: ازآنجاکه $V = L^۳$ و $V + \Delta V = (L + \Delta L_{\perp})(L + \Delta L_{||})^۲$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta L_{\perp}}{L} + \frac{۲\Delta L_{||}}{L} + \cdots$$

$$\alpha_V \Delta T \simeq (\alpha_{\perp} + ۲\alpha_{||})\Delta T = (۲۹ + ۱٫۶)(۱۰^{-۶}/°C)(۲۰۰°C)$$

$$= ۰٫۰۰۶ \quad (\text{یا } ۰٫۶\ v/o)$$

**توضیح.** به‌طور کلی

$$\alpha_V \simeq \alpha_x + \alpha_y + \alpha_z$$

دراینجا زیرنویسی‌که درسمت راست‌نوشته‌شده مربوط به‌ضرایب انبساط خطی درسه‌جهت

محور مختصات است (رابطهٔ ۱ـ۳ـ۲، الف). ▲

**مثال ۴ـ۶ـ۲** در ۵۰۰°C (۷۷۳K) از هر $۱۰^{۱۰}$ اتم، یکی انرژی لازم برای انتقال از محل‌خود درشبکه به‌موقعیت بین‌نشینی را دارد. در ۶۰۰°C (۸۷۳K) این نسبت به $۱۰^{-۹}$ افزایش می‌یابد. الف) انرژی لازم برای این انتقال چقدر است؟ ب) چه‌کسری در ۷۰۰°C (۹۷۳K) انرژی کافی برای انتقال را خواهد داشت؟

حل: طبق رابطهٔ (۴ـ۶ـ۳، ب)

$$\ln\left(\frac{n}{N_{کل}}\right)=\ln M-\frac{E}{kT} \qquad (۵\text{–}۶\text{–}۴)$$

الف)

$$\ln ۱۰^{-۱۰}=-۲۳=\ln M-\frac{E}{(۱۳٫۸\times ۱۰^{-۲۴}\ \mathrm{J/atom\cdot K})(۷۷۳\ \mathrm{K})}$$

و

$$\ln ۱۰^{-۹}=-۲۰٫۷=\ln M-\frac{E}{(۱۳٫۸\times ۱۰^{-۲۴}\ \mathrm{J/atom\cdot K})(۸۷۳\ \mathrm{K})}$$

با حل این دومعادله خواهیم داشت

$$\ln M=-۲٫۹۲$$

و

$$E=۰٫۲۱۴\times ۱۰^{-۱۸}\ \mathrm{J/atom}$$

یا برحسب یك مول

$$E=۱۲۹۰۰۰\ \mathrm{J/mole} \quad (=۳۰۹۰۰\ \mathrm{cal/mole})$$

ب)

$$\ln\left(\frac{n}{N_{کل}}\right)=-۲٫۹۲-\frac{۰٫۲۱۴\times ۱۰^{-۱۸}\ \mathrm{J/atom}}{(۱۳٫۸\times ۱۰^{-۲۴}\ \mathrm{J/atom\cdot K})(۹۷۳\ \mathrm{K})}$$

$$\frac{n}{N_{کل}}=\sim ۶\times ۱۰^{-۹}$$

توضیح. رابطه‌ای که به‌صورت معادلهٔ (۴ـ۶ـ۵) نشان داده شد درمقیاس لگاریتمی برحسب عکس دما، $۱/T$، به‌صورت خطی بیان می‌شود

$$y=C-Bx$$

یا

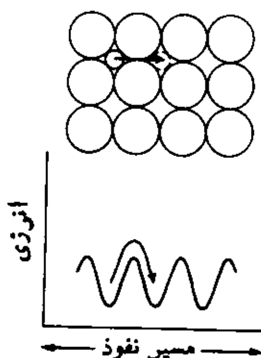
$$\ln\frac{n}{N}=C-\frac{B}{T} \qquad (۴-۶-۶)$$

در اینجا $y=\ln n/N$ و $x=(1/T)$. ضریب زاویه $B$ برابر $E/k$ است. رابطهٔ (۴-۶-۶) را رابطهٔ آرنیوس می‌نامند. در هرحالتی که در آن دما نیروی محرکه محسوب شود، این رابطه دخالت دارد، مثلا در رسانندگی ذاتی نیمرساناها، واکنش کاتالیزوری کنترل نشر، فرایند نفوذ در فلزات، خزش در پلاستیکها، و ویسکوزیتهٔ سیالات. بازهم درمورد این رابطه بحث خواهیم کرد.

## ۴-۷ نفوذ اتمی

همچنان‌که دما افزایش می‌یابد و اتمها با انرژی بیشتری ارتعاش می‌کنند کسر کوچکی از اتمها خود را درون شبکه جابه‌جا می‌کنند. مثال ۴-۶-۲ این کسر را به دما مربوط کرده است. البته این کسر نه تنها به‌دما بستگی دارد، بلکه به استحکام پیوند بین اتمها نیز مربوط می‌شود. انرژی‌لازم برای تغییرمکان هراتم انرژی فعالسازی نام‌دارد. این‌انرژی را می‌توان برحسب کالری برمول به‌صورت $Q$ و برحسب‌ژول براتم به‌صورت $E$ (جدول ۴-۷-۲)، یا برحسب الکترون ولت براتم نشان داد.

می‌توانیم ازشکل ۴-۷-۱ برای نمایش طرحوار انرژی‌فعالسازی استفاده کنیم. اتم کربن کوچك‌است ($r\simeq ۰٫۰۷$ nm) و می‌تواند درمحل بین‌نشینی بین‌تعدادی از اتمهای

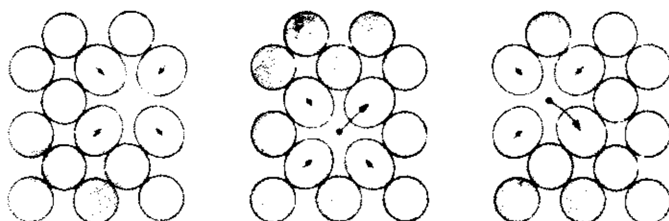



**شکل ۴-۷-۱** حرکت اتمی، مکانیسم بین‌نشینی. انرژی اضافی‌لازم‌است زیرا زمانی که اتم بین نشین بخواهد به‌طرف محل بعدی حرکت کند، فواصل بین اتمی معمولی بین اتمهای بزرگ، تغییرخواهدکرد.

آهن جا گیرد. اگر به‌اندازهٔ کافی انرژی داشته باشد*، زمانی که در جهت آن ارتعاش می‌کند می‌تواند، بین اتمهای آهن فشرده شده و به محل بین‌نشینی بعدی بـرود. در ۲۰°C ، تنها احتمال اندکی وجود دارد که این اتم آن اندازه انرژی داشته باشد. در دماهای بالاتر این احتمال افزایش می‌یابد (به‌مثال ۴ـ۶ـ۲ مراجعه کنید).

سایر مکانیسمهای نفوذ در شکل ۴ـ۷ـ۲ رسم شده‌اند. اگر تمام اتمها هم اندازه یـا تقریباً هم اندازه باشند، مکانیسم تهیجای نقش عمده‌ای می‌یابد. تهیجایها می‌توانند قسمتی از ساختار معیوب باشند (شکل ۴ـ۲ـ۳) یا به‌علت تغییرات گرمـایی وسیع به‌وجود آیند (مانند مثال ۴ـ۴ـ۳ که در آن آلومینیم درست ۱۰ درجه زیر نقطهٔ ذوب خود بود).

**نفوذپذیری.** وقتی اتمی به‌درون یك تهیجای برود، حفرهٔ جدیدی باز می‌شود. به‌نوبهٔ‌خود این‌جای باز شده نیز می‌تواند اتمی را از هر یك از محلهای همسایه دریافت کند. در نتیجه یك تهیجای درمیان بلور «حرکت تصادفی» به‌وجود می‌آورد. همین‌مکانیسم حرکت تصادفی



(الف)



(ب)

**شکل ۴ـ۷ـ۲** مکانیسمهای نفوذ. الف) به‌وسیلهٔ تهیجای؛ ب) به‌وسیلهٔ بین‌نشینی. تهیجایها درجهت عکس حـرکت اتمهای نفوذکننده حـرکت می‌کنند (درفصل بعد حرکت حفره‌های الکترونی را بررسی خواهیم کرد). این حرکتها ازنظر آماری «حرکت تصادفی» محسوب می‌شوند.

---

* درحدود ۳۴۰۰۰ کالری بر مول، $0{,}24 \times 10^{-18}$ ژول براتم، یـا ۱٫۵ الکترون ولت براتم.

را می‌توان برای اتم کربن که درمیان اتمهای آهن از یك بین‌نشینی به بین‌نشینی دیگرمی‌رود نیز درنظرگرفت. با این‌حال اغلب به گرادیانهای غلظت برمی‌خوریم. مثلا فرض کنید در نقطهٔ (۱) به‌ازای هر ۲۰ سلول واحدآهن fcc یك اتم کربن وجود داشته باشد، و درنقطهٔ (۲) که یك میلی‌متر دورتر قراردارد به‌ازای هر ۳۰ سلول واحد تنها یك اتم کربن موجود باشد. حال، ازآنجا که در هر نقطهٔ حرکت تصادفی اتمهای کربن وجود دارد، شارخالصی را ازحرکت اتمهای‌کربن از نقطهٔ (۱) به‌نقطهٔ (۲) خواهیم یافت زیرا به‌سادگی می‌توان گفت تعداد اتمهایی که در نزدیکی نقطهٔ (۱) پرش می‌کنند نیم‌برابر بیشتر است (مثال ۴ــ۸ــ۱ را ببینید). این شارش خالص اتمها (یا مولکولها) نفوذ نام دارد.

شار $J$ حرکت اتمها (که برحسب اتم برسانتی‌مترمربع. ثانیه بیان می‌شود) با گرادیان غلظت $(C_2-C_1)/(x_2-x_1)$ متناسب است و به‌صورت رابطهٔ ریاضی زیر بیان می‌شود

$$J=-D\frac{dC}{dx} \qquad \text{(۴ــ۷ــ۱، الف)*}$$

ثابت تناسب $D$ نفوذپذیری یا ضریب نفوذ نامیده‌می‌شود. علامت منفی‌نشان می‌دهد که شار درجهت سرازیری وجود دارد. واحدها عبارت‌اند از

$$\frac{\text{اتم}}{(\text{m}^2)(\text{sec})}=\left[\frac{\text{m}^2}{\text{sec}}\right]\left[\frac{\text{اتم}/\text{m}^3}{\text{m}}\right] \qquad \text{(۴ــ۷ــ۱، ب)}$$

نفوذپذیری به طبیعت اتمهای حل شونده، به طبیعت ساختار جامد، و به‌تغییرات دما بستگی دارد. درجدول ۴ــ۷ــ۱ چند مثال‌آورده شده‌است. بعضی از دلایل‌مربوط به‌مقادیر متفاوت جدول ۴ــ۷ــ۱ به‌قرار زیراست:

۱. دماهای بالاتر موجب نفوذپذیری بیشتری می‌شوند، زیرا اتمها انرژی‌گرمایی بیشتری دارند و درنتیجه احتمال بیشتری برای فعال‌شدن‌آنها وگذشتن از مانع انرژی بین اتمها (شکل ۴ــ۷ــ۱) وجود دارد.

۲. نفوذپذیری‌کربن درآهن از نفوذپذیری نیکل درآهن بیشتر است زیرا اتم کربن کوچکتر است (پیوست ب).

---

* این رابطه قانون اول فیك نامیده می‌شود. قانون دوم فیك به‌صورت زیراست

$$\frac{\partial C}{\partial t}=D\left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2}\right) \qquad \text{(۴ــ۷ــ۲)}$$

که نشاندهندهٔ سرعت تغییرغلظت نسبت به‌زمان است. درحقیقت مقادیر $\partial C/\partial t$ و $\partial^2 C/\partial x^2$ به‌طور تجربی درآزمایشگاه تعیین شده‌اند و ازآنها مقادیر $D$ داده شده در جدول ۴ــ۷ــ۱ محاسبه شده است.

**جدول ۴-۷-۱** نفوذپذیری اتمی*

| جسم حل‌شدنی | حلال (ساختار اصلی) | نفوذپذیری، $m^۲/sec$ | |
|---|---|---|---|
| | | ۵۰۰°C (۹۳۰°F) | ۱۰۰۰°C (۱۸۳۰°F) |
| ۱. کربن | آهن fcc | $(۵ \times ۱۰^{-۱۵})$** | $۳ \times ۱۰^{-۱۱}$ |
| ۲. کربن | آهن bcc | $۱۰^{-۱۲}$ | $(۲ \times ۱۰^{-۹})$ |
| ۳. آهن | آهن fcc | $(۲ \times ۱۰^{-۲۳})$ | $۲ \times ۱۰^{-۱۶}$ |
| ۴. آهن | آهن bcc | $۱۰^{-۲۰}$ | $(۳ \times ۱۰^{-۱۴})$ |
| ۵. نیکل | آهن fcc | $۱۰^{-۲۳}$ | $۲ \times ۱۰^{-۱۶}$ |
| ۶. منگنز | آهن fcc | $(۳ \times ۱۰^{-۲۴})$ | $۱۰^{-۱۶}$ |
| ۷. روی | مس | $۴ \times ۱۰^{-۱۸}$ | $۵ \times ۱۰^{-۱۳}$ |
| ۸. مس | آلومینیم | $۴ \times ۱۰^{-۱۴}$ | $۱۰^{-۱۰}M$*** |
| ۹. مس | مس | $۱۰^{-۱۸}$ | $۲ \times ۱۰^{-۱۳}$ |
| ۱۰. نقره | نقره (بلور) | $۱۰^{-۱۷}$ | $۱۰^{-۱۲}M$ |
| ۱۱. نقره | نقره (مرزدانه) | $۱۰^{-۱۱}$ | — |
| ۱۲. کربن | تیتانیم hcp | $۳ \times ۱۰^{-۱۶}$ | $(۲ \times ۱۰^{-۱۱})$ |

* از روی داده‌های جدول ۴-۷-۲ محاسبه شده است.

** پرانتزها نشان می‌دهند که فاز ناپایدار است.

*** اگرچه دما بالاتر از نقطهٔ ذوب است ولی M محاسبه شده است.

۳. مس درآلومینیم راحت‌تر نفوذ می‌کند تا درخود مس‌زیرا پیوندهای Cu—Cu قویتر از پیوندهای Al—Al هستند (همچنان‌که از دمای ذوب‌آنها این نکته پیداست).

۴. اتمها برای‌نفوذ درآهن bcc نفوذپذیری بیشتری دارند تا درآهن fcc، زیرا اولی ضریب فشردگی اتمی‌کمتری دارد (۰٫۶۸ در مقابل ۰٫۷۴)، بعداً خواهیم دید که ساختار fcc حفره‌های بین‌نشینی بزرگتری دارد ولی با این‌حال‌راه عبور بین‌حفره‌های‌آن کوچکتر از ساختار bcc است.

۵. نفوذ در امتداد مرزدانه‌ها سریعتر انجام می‌گیرد زیرا این، ناحیهٔ عیوب بلوری است (شکل ۴-۴-۷).

**نفوذپذیری برحسب دما.** در بخش ۴ـ۶ توزیع انرژی گرمایی را به‌دما مربوط کردیم. بولتسمان توانست این موضوع را با رابطهٔ (۴ـ۶ـ۳) نشان دهد که در آن افزایش تعداد اتمهایی که بیشتر از حد معین انرژی دارند متناسب است با تابعی‌نمایی، که شامل این انرژی و عکس‌دماست. با نفوذ، انرژی فعالسازی برای‌حرکتهای اتمی به‌انرژی $E$ رابطهٔ بولتسمان مربوط می‌شود. بنابراین

$$D = D_{\circ} e^{-E/kT} \qquad (۴ـ۷ـ۳)$$

که درآن $D_{\circ}$ ثابت تناسب و مستقل از دماست و $M$ موجود در رابطهٔ (۴ـ۶ـ۳ب) را دربرمی‌گیرد. لگاریتم نفوذپذیری با عکس دما، $۱/T$، متناسب است

$$\ln D = \ln D_{\circ} - \frac{E}{kT} \qquad (۴ـ۷ـ۴، الف)$$

حرف دیگر همان $k$، ثابت بولتسمان رابطهٔ (۴ـ۶ـ۳) است که مقدار آن $۱۳٫۸ \times ۱۰^{-۲۴}\ \mathrm{J/atom \cdot K}$ بود.

درجدول ۴ـ۷ـ۲ مقادیر $D_{\circ}$ و انرژی فعالسازی تعدادی از واکنشهای نفوذ آمده است. ازآنجا که شیمیدانان واحدهای‌کالری و مولی را ترجیح می‌دهند. می‌توانیم رابطهٔ بالا را به‌صورت زیر بازنویسی کنیم

$$\ln D = \ln D_{\circ} - \frac{Q}{TR} \qquad (۴ـ۷ـ۴، ب)$$

انرژی به‌صورت $Q$ (کالری برمول) بیان شده، ثابت $R$ برابر $۱٫۹۸\ \mathrm{cal/mole \cdot K}$ است.

دوازده ردیف داده‌های جدولهای ۴ـ۷ـ۱ و ۴ـ۷ـ۲ درشکل ۴ـ۷ـ۳ ترسیم‌شده است. اینها نمودارهای نوع آرنیوس‌اند.*

**مثال ۴ـ۷ـ۱** درسطح قطعه‌ای‌آلومینیمی ۰٫۱۹ درصد اتمی‌مس‌ودر $۱٫۲\ \mathrm{nm}$ زیرسطح آن ۰٫۱۸ درصد اتمی مس وجود دارد. شار اتمهای مس از سطح به طرف داخل در $۵۰۰^{\circ}\mathrm{C}$ چقدر است. (آلومینیم fcc و $a = ۰٫۴۰۴۹\ \mathrm{nm}$ است.)

حل:

$$\frac{\text{اتم}}{\mathrm{mm}^۳} = \frac{۴}{(۰٫۴۰۴۹ \times ۱۰^{-۶}\ \mathrm{mm})^۳}$$

$$= \frac{۶ \times ۱۰^{۱۹}}{\mathrm{mm}^۳}$$

---

* توضیح بعد ازمثال ۴ـ۶ـ۲ را ببینید.

**جدول ۴-۷-۲** ثابتهای محاسبات نفوذپذیری

$$\left(\ln D=\ln D_{\circ}-\frac{Q}{RT}=\ln D_{\circ}-\frac{E}{kT}\right)^{*}$$

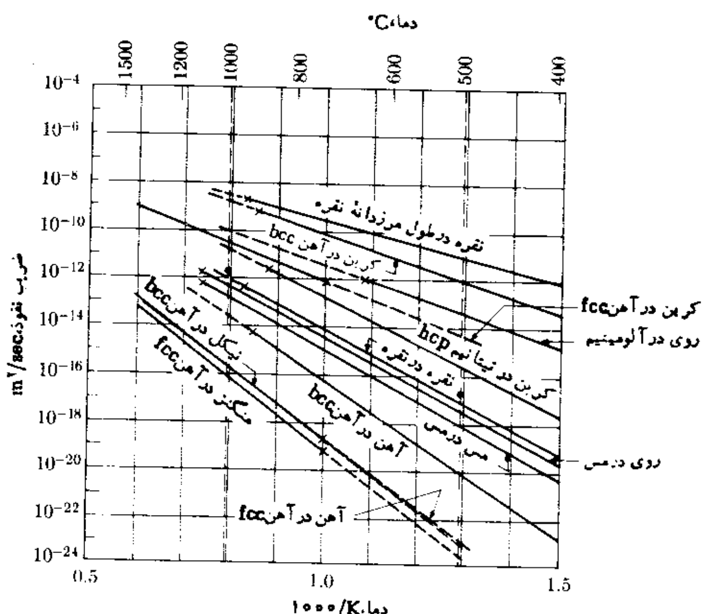
| جسم حل‌شدنی | حلال (ساختار میز بان) | $D_{\circ}$ $m^{۲}/sec$ | $Q$ cal/mole | $E$ J/atom |
|---|---|---|---|---|
| ۱. کربن | آهن fcc | $۰٫۲ \times ۱۰^{-۴}$ | ۳۴۰۰۰ | $۰٫۲۳۶ \times ۱۰^{-۱۸}$ |
| ۲. کربن | آهن bcc | $۲٫۲ \times ۱۰^{-۴}$ | ۲۹۳۰۰** | $۰٫۲۰۴ \times ۱۰^{-۱۸}$ |
| ۳. آهن | آهن fcc | $۰٫۲۲ \times ۱۰^{-۴}$ | ۶۴۰۰۰ | $۰٫۴۴۵ \times ۱۰^{-۱۸}$ |
| ۴. آهن | آهن bcc | $۲٫۰ \times ۱۰^{-۴}$ | ۵۷۵۰۰ | $۰٫۴۰۰ \times ۱۰^{-۱۸}$ |
| ۵. نیکل | آهن fcc | $۰٫۷۷ \times ۱۰^{-۴}$ | ۶۷۰۰۰ | $۰٫۴۶۵ \times ۱۰^{-۱۸}$ |
| ۶. منگنز | آهن fcc | $۰٫۳۵ \times ۱۰^{-۴}$ | ۶۷۵۰۰ | $۰٫۴۶۹ \times ۱۰^{-۱۸}$ |
| ۷. روی | مس | $۰٫۳۴ \times ۱۰^{-۴}$ | ۴۵۶۰۰ | $۰٫۳۱۷ \times ۱۰^{-۱۸}$ |
| ۸. مس | آلومینیم | $۰٫۱۵ \times ۱۰^{-۴}$ | ۳۰۲۰۰ | $۰٫۲۱۰ \times ۱۰^{-۱۸}$ |
| ۹. مس | مس | $۰٫۲ \times ۱۰^{-۴}$ | ۴۷۱۰۰ | $۰٫۳۲۷ \times ۱۰^{-۱۸}$ |
| ۱۰. نقره | نقره (بلور) | $۰٫۴ \times ۱۰^{-۴}$ | ۴۴۱۰۰ | $۰٫۳۰۶ \times ۱۰^{-۱۸}$ |
| ۱۱. نقره | نقره (مرزدانه) | $۰٫۱۴ \times ۱۰^{-۴}$ | ۲۱۵۰۰ | $۰٫۱۴۹ \times ۱۰^{-۱۸}$ |
| ۱۲. کربن | تیتانیم hcp | $۵٫۱ \times ۱۰^{-۴}$ | ۴۳۵۰۰ | $۰٫۳۰۲ \times ۱۰^{-۱۸}$ |

* $R=۱٫۹۸۷$ cal/mole·K ؛ $k=۱۳٫۸ \times ۱۰^{-۲۴}$ J/atom·K

** زیر ۴۰۰°C، کمتر است.

$$\left(\frac{dC}{dx}\right)_{Cu}=\frac{[(۰٫۰۰۱۸-۰٫۰۰۱۹)(۶ \times ۱۰^{۱۹}/mm^{۳})]}{۱٫۲\ mm}$$

$$=-۵ \times ۱۰^{۱۵}\ Cu/mm^{۴}$$




**شکل ۴ـ۷ـ۳** نفوذپذیری برحسب‌دما (جدولهای ۴ـ۷ـ۱ و ۴ـ۷ـ۲ را ببینید).

ازجدول ۴ـ۷ـ۲ و رابطهٔ (۴ـ۷ـ۳) نتیجه می‌گیریم که

$$\text{نفوذ} = (۰٫۱۵ \times ۱۰^{-۴}\,\mathrm{m^۲/sec})\exp\left(\frac{-۰٫۲۱۰\times ۱۰^{-۱۸}\,\mathrm{J}}{(۱۳٫۸\times ۱۰^{-۲۴}\,\mathrm{J/K})(۷۷۳\,\mathrm{K})}\right)$$

$$= \sim ۴\times ۱۰^{-۱۴}\,\mathrm{m^۲/sec}$$

$$\text{شار} = -(۴\times ۱۰^{-۱۴}\,\mathrm{m^۲/sec})(-۵\times ۱۰^{۱۵}\,\mathrm{Cu/mm^۴})(۱۰^۶\,\mathrm{mm^۲/m^۲})$$

$$= ۲\times ۱۰^۸\,\mathrm{Cu/mm^۲\cdot sec}$$

توضیح. مقدار نفوذپذیری مس‌را نیز می‌توان ازشکل ۴ـ۷ـ۳ (و برای ۵۰۰°C، ازجدول ۴ـ۷ـ۱) به‌دست آورد. ازآنجاکه انرژی‌فعالسازی درتوان رابطهٔ مذکور وجود دارد، سه رقم با معنی آن درمقدار نفوذپذیری حفظ نمی‌شود. مقادیر نفوذپذیری معمولاً با یك یا دورقم با معنی بیان می‌شوند. ▲

**مثال ۴ـ۷ـ۲** نفوذپذیری آلومینیم درمس در ۵۰۰°C برابر $۲٫۶ \times ۱۰^{-۱۷}\,\mathrm{m^۲/sec}$،

و در $۱۰۰۰^\circ C$ برابر $۱٫۶ \times ۱۰^{-۱۲} m^۲/sec$ است. الف) مقدار $D_\circ$، $Q$ و $E$ را برای زوج نفوذی معین کنید. ب) نفوذپذیری در $۷۵۰^\circ C$ چقدر است؟

حل: از رابطهٔ (۴ـ۷ـ۴، الف)

الف)
$$\ln(۲٫۶ \times ۱۰^{-۱۷}) = \ln D_\circ - \frac{E}{۱۳٫۸ \times ۱۰^{-۲۴}(۷۷۳)}$$

$$\ln ۱٫۶ \times ۱۰^{-۱۲} = \ln D_\circ - \frac{E}{۱۳٫۸ \times ۱۰^{-۲۴}(۱۲۷۳)}$$

با حل این دو معادله مقادیر زیر به‌دست می‌آید

$$D_\circ = ۴ \times ۱۰^{-۵}\, m^۲/sec$$

$$E = ۰٫۳ \times ۱۰^{-۱۸}\, J/atom$$

با حل رابطهٔ (۴ـ۷ـ۴، ب)

$$Q = ۴۳۰۰۰\, cal/mole$$

ب) از رابطهٔ (۴ـ۷ـ۴، الف)

$$\ln D = \ln ۴ \times ۱۰^{-۵} - \frac{۰٫۳ \times ۱۰^{-۱۸}\, J}{(۱۳٫۸ \times ۱۰^{-۲۴}\, J/K)(۱۰۲۳\, K)}$$

بنابراین

$$D = \sim ۲٫۵ \times ۱۰^{-۱۴}\, m^۲/sec \quad (\text{یا } ۱۰^{-۱۳٫۶}\, m^۲/sec)$$

این مقدار را می‌توان از شکل ۴ـ۷ـ۳ با قراردادن مقادیر معلوم (نقاط) روی نمودار آرنیوس و درون‌یابی به‌دست آورد. (ولی برای خواندن صحیح مقیاسهای غیرخطی باید دقت کرد.)

توضیح. دیده می‌شود که نفوذپذیری مس در آلومینیم بیشتر از آلومینیم در مس است. این موضوع را می‌توان از اطلاعات مربوط به‌استحکام پیوند فلزات میزبان نیز حدس زد

$$(T_m \text{ مس}) > (T_m \text{ آلومینیم})$$

بنابراین

$$D_{Al/Cu} < D_{Cu/Al}$$ ▲

**مثال ۴-۷-۳** فولادی حاوی ۵ر۸ درصد وزنی نیکل در مرکز $x$ دانهٔ آهن fcc و ۸ر۸ درصد وزنی نیکل درکنارهٔ $e$ دانه است. این دونقطه ۴۰ µm از هم فاصله دارند. شار اتمی بین $x$ و $e$ در ۱۲۰۰°C چقدر است؟ ($a=$ ۳۶۵ر۰ nm)

حل: مبنا: ۱۰۰ amu در $x$

$$\frac{(۱۰۰\ \text{amu})(۰۸۵ر۰)}{۵۸٫۷۱\ \text{amu/Ni}}=۱۴۴۸ر۰=\ ۱ر۸\ \text{a/o Ni}$$

$$\frac{(۱۰۰\ \text{amu})(۹۱۵ر۰)}{۵۵٫۸۵\ \text{amu/Fe}}=۶۳۸ر۱\ \ =۹ر۹۱\ \text{a/o Fe}$$

$$\overline{\ ۷۸۳ر۱\ }$$

در $e$

$$\sim ۴ر۸\ \text{a/o Ni}$$

در هر سلول واحد

$$C_x=\frac{(۴\ \text{atoms})(۰۸۱ر۰)}{(۳۶۵ر۰\times ۱۰^{-۹}\ \text{m})^۳}=۶۶ر۶\times ۱۰^{۲۷}/\text{m}^۳$$

$$C_e=\frac{(۴\ \text{atoms})(۰۸۴ر۰)}{(۳۶۵ر۰\times ۱۰^{-۹}\ \text{m})^۳}=۹۱ر۶\times ۱۰^{۲۷}/\text{m}^۳$$

$$\ln D=\ln\,(۷۷ر۰\times ۱۰^{-۴}\ \text{m}^۲/\text{s})-\frac{۴۶۵ر۰\times ۱۰^{-۱۸}\ \text{J}}{(۳۸ر۱\times ۱۰^{-۲۴}\ \text{J/K})(۱۴۷۳\ \text{K})}$$

$$D=۹\times ۱۰^{-۱۵}\ \text{m}^۲/\text{sec}$$

$$\text{شار}=-\frac{(۹\times ۱۰^{-۱۵}\ \text{m}^۲/\text{s})(۶۶ر۶-۹۱ر۶)(۱۰^{۲۷}/\text{m}^۳)}{۴۰\times ۱۰^{-۶}\ \text{m}}$$

$$=۶ر۵\times ۱۰^{۱۶}\ \text{atoms/m}^۲\cdot\text{s}$$

توضیح. باید به‌جای درصد وزنی با درصد اتمی کارکنیم زیرا شار مربوط به اتمهاست نه جرم. ▲

## □ ۴-۸ فرایندهای نفوذ

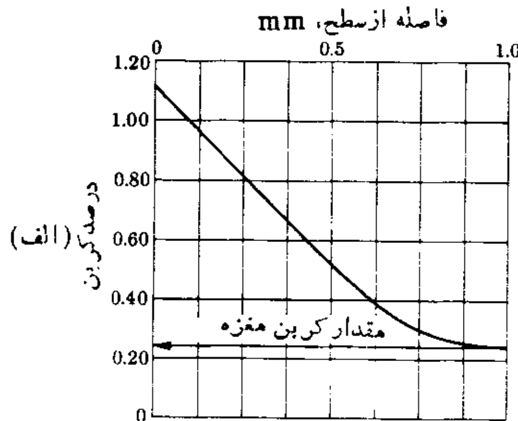
نفوذکاربردهای متعددی درفرایندهای فنی دارد. خواننده ممکن است با کربنی‌کردن فولاد

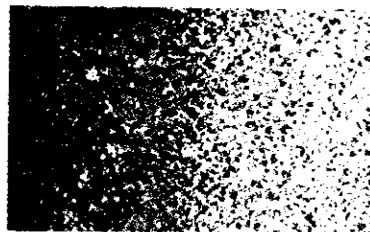
آشنا باشد. دراین‌فرایند، فولادکم‌کربن (که نسبتاً چقرمه ولی‌نرم است) درمحیطی حاوی کربن گرم می‌شود، به‌طوری‌کـه کربن در فولاد نفوذ می‌کند و پوستهٔ سخت و پرکربنی به‌وجود می‌آورد (شکل ۴ـ۸ـ۱). با نمونهٔ دیگری از فرایندهای تجارتی نفوذ درساخت تیمرسانا‌ها برخورد می‌کنیم. بور می‌تـواند درسیلیسیم نفوذکند و نـاحیهٔ نوع $p$ را در وسایل پیوندی به‌وجودآورد (فصل د).

در اینجا درمورد جزئیات این فرایندها بحثی‌نخواهیم‌کرد ولی‌یادآوری می‌شودکه باید نفوذپذیری و زمان‌فرایند را به‌طورهمزمان بررسی‌کرد. اگرطرفین رابطهٔ (۴ـ۷ـ۱) را در زمان ضرب‌کنیم شارکل را به‌دست خواهیم‌آورد

$$\text{اتم}/\mathrm{cm}^{2} = Dt\left(-\frac{dC}{dx}\right) \qquad (۴ـ۸ـ۱)$$

بنابراین‌کل تعداد اتمهایی‌که از واحد سطح و با گرادیان غلظتی ثابتی وارد ماده شده یا




**شکل ۴ـ۸ـ۱** فـولاد کربنی شده (سطح میله درطرف چپ است). ابتدا در تمام این میلهٔ ۲۵ میلی‌متری، ۲۴ر۰٪ کربن وجود داشت. فولاد در حضور کربن اضافی تا ۸۷۰°C (۱۸۰۰°F) گرم شد تـا کربن از سطح به‌داخل نفوذکند. (ناحیهٔ غنی شده ازکربن توسط حکاکی تیره شده است.)

ازآن خارج می‌شوند متناسب است باحاصل‌ضرب نفوذپذیری و زمان، $Dt$ . این رابطهٔ مناسبی‌است زیرا بهما امکان‌می‌دهد که زمان‌انجام فرایند را به‌صورت تابعی‌از دما برآورد کنیم. مثلا فرض‌کنید پوستهٔ کربنی شده‌ای به‌ضخامت $۰٫۱$ mm روی فولاد (آهن fcc) درمدت ۱۰۰ دقیقه، در $۸۰۰°C$ تشکیل شده است و در آن نفوذپذیری تقریباً برابر $۲٫۴ \times ۱۰^{-۱۲}$ m²/sec است. باهمین گرادیان غلظتی در $۱۰۰۰°C$ فقط ۸ دقیقه طول می‌کشد زیرا نفوذپذیری ۱۲٫۵ برابر است (تقریباً $۳ \times ۱۰^{-۱۱}$ m²/sec از جدول ۴-۷-۱).

ضخامت پوسته با رابطهٔ $\sqrt{Dt}$ افزایش می‌یابد*

$$x \propto \sqrt{Dt} \qquad (۴\text{-}۸\text{-}۲)$$

از این رابطه و مثالهای پاراگراف قبل می‌توان گفت درمدت ۳۰ دقیقه در $۱۰۰۰°C$ پوسته‌ای به‌ضخامت تقریباً $۱٫۹$ mm تشکیل می‌شود

$$\frac{[(۲٫۴ \times ۱۰^{-۱۲}\,\text{m}^۲/\text{s})(۶\,۰۰۰\,\text{s})]^{۱/۲}}{۱\text{mm}} = \frac{\sqrt{Dt}}{x}$$

$$\frac{\sqrt{Dt}}{x} = \frac{[(۳ \times ۱۰^{-۱۱}\,\text{m}^۲/\text{s})(۱۸۰۰\,\text{s})]^{۱/۲}}{\sim ۱٫۹\,\text{mm}}$$

**مثال ۴-۸-۱** درسطح میله‌ای فولادی به‌ازای هر ۲۰ سلول واحد آهن یک اتم‌کربن وجود دارد. یک میلی‌متر زیرسطح، به ازای هر ۳۰ سلول واحد یک اتم‌کربن وجود دارد. نفوذپذیری آن در $۱۰۰۰°C$ برابر $۳ \times ۱۰^{-۱۱}$ m²/sec است. ساختار جسم در $۱۰۰۰°C$، fcc است ($a = ۰٫۳۶۵$ nm). در هر دقیقه در هرسلول واحد چند اتم‌کربن نفوذ می‌کند؟

حل: غلظتهای کربن عبارت‌اند از

$$C_۲ = \frac{۱}{[۳۰(۰٫۳۶۵ \times ۱۰^{-۹}\,\text{m})^۳]}$$

$$= ۰٫۶۸ \times ۱۰^{۲۷}/\text{m}^۳$$

$$C_۱ = \frac{۱}{۲۰(۰٫۳۶۵ \times ۱۰^{-۹}\,\text{m})^۳}$$

$$= ۱٫۰۳ \times ۱۰^{۲۷}/\text{m}^۳$$

* این رابطه را می‌توان از قانون فیک رابطهٔ (۴-۷-۲) در پانوشت بخش‌قبل به‌دست‌آورد.

با استفاده از رابطهٔ (۴ـ۷ـ۱، الف)

$$J = -\frac{(۳\times ۱۰^{-۱۱}\ m^۲/sec)(۰٫۶۸-۱٫۰۳)(۱۰^{۲۷}/m^۳)}{(۱۰^{-۳}m)}$$

$$= ۱٫۰۵\times ۱۰^{۱۹}/m^۲ \cdot sec \quad (\text{یا}\ \sim ۱۰^{۱۳}/mm^۲ \cdot sec)$$

هرسلول واحد سطح مقطعی برابر $(۰٫۳۶۵\times ۱۰^{-۹}\ m)^۲$ دارد. درنتیجه

$$J_{u.c.} = (۱٫۰۵\times ۱۰^{۱۹}/m^۲ \cdot sec)(۰٫۳۶۵\times ۱۰^{-۹}m)^۲(۶۰\ sec/min)$$

$$= ۸۴\ atoms/min$$

توضیح. واضح است که قطعهٔفولادی مادهٔ بی‌حرکتی‌نیست و درحقیقت تغییراتی در درون آن اتفاق می‌افتد.

می‌توانیم از فرایند فوق برای‌کربن‌دادن به‌فولاد بهره‌جوییم. درفصل ۱۱ خواهیم دیدکه چگونه از این مزیت برای بهبود سختی سطح فولاد استفاده می‌شود. ▲

**مثال ۴ـ۸ـ۲** نیکل رادیواکتیو به‌مدت ۲۰ دقیقه در $۱۲۰۰°C$ درسطح آهن نفوذکرده است. حد تأثیر رادیواکتیو، محلی‌در ۱٫۵ میلی‌متری‌زیرسطح است. نمونهٔ مشابهی به‌مدت یك ساعت در $۱۱۰۰°C$ گرم شده است. آیا حد تأثیر آن از ۱٫۵ میلی‌متری‌که در نمونهٔ اول دیده می‌شود بیشتر است یا کمتر؟

حل: آهن در این دماها fcc است. از جدول ۴ـ۷ـ۲، رابطهٔ (۴ـ۷ـ۳ یا ۴ـ۷ـ۴)، و رابطهٔ (۴ـ۸ـ۲) داریم

$$D_{۱۲۰۰} = (۰٫۷۷\times ۱۰^{-۴}\ m^۲/s)\exp\frac{(-۶۷\,۰۰۰\ cal/mole)}{(۱٫۹۸۷\ cal/mole\cdot K)(۱۴۷۳\ K)}$$

$$= ۹\times ۱۰^{-۱۵}\ m^۲/sec$$

$$D_{۱۱۰۰} = ۱٫۷\times ۱۰^{-۱۵}\ m^۲/sec$$

$$\frac{\sqrt{Dt}}{x} = \text{براساس}\ ,\ \text{یا ثابت} \quad x \propto \sqrt{Dt}$$

$$\left(\frac{\sqrt{(۹\times ۱۰^{-۱۵}\ m^۲/s)(۱۲۰۰\ s)}}{۱٫۵\ mm}\right)_{۱۲۰۰°C}$$

$$= \left(\frac{\sqrt{۱٫۷\times ۱۰^{-۱۵}\ m^۲/s)(۳۶۰۰\ s)}}{x}\right)_{۱۱۰۰°C}$$

$$x = ۱٫۱\ mm \quad (< ۱٫۵\ mm)$$ ▲

## مرور و بررسی مطالب

درفصل ۳ به‌دقت و نظم‌ساختار اتمی بلورها توجه‌شد. برای‌بسیاری ازخواص و مشخصات مواد نظیرچگالی، ناهمسانگردی، صفحات لغزش، پایداری فاز، خاصیت پیزوالکتریکی، و ترکیبات نیمرسانا، بلورهای‌کامل به‌عنوان مبنا به‌کارمی‌روند. درعین‌حال، بلورها همیشه کامل نیستند و خیلی از خــواص مهم و رفتار مــواد از بی‌نظمی‌آنها نــاشی می‌شود. در چشم‌انداز این‌فصل بعضی از این مطالب را بیان‌کردیم. بی‌نظمی مواد را نیز باید همانند نظم آن درنظرداشته باشیم.

### خلاصه

ناخالصیها درتمام‌مواد یافت‌می‌شوند، مگراینکه با وسایل‌مخصوصی‌آنها را تا سطح پایینی کاهش‌داده باشیم. آلیاژ فلزی‌است باناخالصیهایی‌که عمداً اضافه شده‌اند. محلولهای‌جامد شامل اتمها (یا مولکولها)یی ازجزء دیگر تحت عنوان حــل‌شونده‌اند. اینها ممکن است به‌صورت بین‌نشینی بین اتمهای حلال، یــا به‌صورت جــانشینی درون شبکهٔ بلوری وجود داشته باشند. برای اینکه محلول جامد دربلور به‌وجودآیــد لازم است جسم حل‌شونده و حلال در اندازه و رفتار الکترونیکی قابل مقایسه باشند.

عیوب درتمام بلورها یافت می‌شود مگراینکه با وسایل مخصوصی‌آنها را تــا سطح پایینی‌کاهش داده باشیم. بهتراست‌آنها را ازنظرهندسی طبقه‌بندی‌کنیم.

۱. عیوب نقطه‌ای، که شامل تهیجایها یا بین‌نشینیهاست؛

۲. عیوب خطی، که معمولاً نابجایی نامیده می‌شوند؛ و

۳. مرزها، که می‌توانند سطوح خارجی یا جدایی داخلی بین‌دانه‌ها یا فازها باشند. اینها را می‌توان عیوب دوبعدی به‌حساب‌آورد.

مایعات معمولاً نظم بردامنه‌را که مشخصهٔ بلورهاست‌ندارند. در بعضی‌ازمواد می‌توان از بلوری‌شدن جلوگیری‌کرد و خاصیت بی‌شکلی‌مایع را در جــامد نیز نگه داشت، (۱) به‌شرط‌آنکه ساختار بلوری پیش‌بینی شده پیچیده باشد؛ یــا (۲) با سریع سردکردن. این جامدات بی‌شکل را تحت عنوان شیشه نامگذاری می‌کنیم. حتی اگر دمــای انجماد معین نباشد، مواد بی‌شکل دمایی تحت عنوان دمای شیشه‌ای، $T_g$ دارندکــه هنگام مطالعه رفتار پلاستیکها اهمیت بسیار دارد.

فاز به‌صورت قسمتی از ماده‌که به‌وسیلهٔ ساختار و یــا ترکیب از دیگرقسمتها مجزا شده است، تعریف می‌شود.

درهرلحظه انرژی بیشتر اتمها یا مولکولهانزدیک به‌مقدار میانگین‌است. با این‌حال بعضی‌ازآنها انرژی بسیارکم و بعضی دیگرانرژی فوق‌العاده زیادی خواهندداشت. بخشی از این توزیع آماری‌که مربوط به انرژی‌بالاست مورد توجه‌ماست، زیرا اتمها ممکن‌است آنقدر فعال شوندکه پیوندها را بشکنند و در داخل ماده به‌محلهای جدیدی نفوذکنند. تنها

ازطریق این‌مکانیسم است که ساختار درونی (و درنتیجه خواص) ماده را می‌توان تغییر داد. در این حالات، نفوذ راحت‌تر رخ می‌دهد: (۱) در دماهای بالا؛ (۲) وقتی اتم نفوذکننده کوچك باشد (مثلا کربن درآهن)؛ (۳) وقتی ضریب فشردگی ساختار میزبان پایین باشد (مثلا bcc درمقابل fcc)؛ (۴) وقتی پیوندهای ساختارمیزبان ضعیف باشند (مثلا موادی که نقطهٔ ذوب پایینی دارند)؛ و (۵) وقتی عیوبی درماده باشد (مثلا تهیجای یا مرزدانه).

## سؤالات تشریحی

۱. تفاوت بین برنج و مفرغ چیست؟

۲. تفاوت بین آلیاژی را که مخلوط فازهاست با آلیاژی که محلول‌جامد است ذکر کنید.

۳. تفاوت بین حلال و جسم حل‌شدنی درمحلولهای جامد چیست؟

۴. تفاوت بین محلولهای جامد بین‌نشینی و جانشینی چیست؟

۵. ازپیوست (ب) عناصری را انتخاب کنید که برای محلول جامد جانشینی با آهن‌فلزی اندازهٔ مناسبی‌دارند. یونهایی‌را انتخاب کنید که می‌توانند جانشین یون $Fe^{2+}$ شوند.

۶. برای اینکه محلول جامد منظم را یك ترکیب به‌حساب آوریم، دلیل خوبی وجود دارد. آن را شرح دهید.

۷. با وجود اینکه AlMg مانند FeO نااستوکیومتری است ولی برخلاف FeO، تهیجای قابل‌توجهی ندارد. تفاوت را شرح دهید.

۸. چرا عیوب شاتکی به‌صورت جفت جفت ظاهر می‌شوند؟

۹. منشأ انرژی سطحی و انرژی مرزدانه را شرح دهید.

۱۰. اثرات مختلف مرزدانه‌ها را روی رفتار مواد بنویسید.

۱۱. بزرگنمایی را همیشه بر اساس مضرب خطی نشان می‌دهند. برای بزرگنمایی ۱۰۰، مضرب سطحی چقدر است.

۱۲. عدد اندازهٔ دانهٔ ۵ درهر اینچ مربع درمقطع دوبعدی ــــ برابر عدد اندازه دانهٔ ۳، دانه دارد. ابعاد خطی اولی ــــ برابر بزرگتر است. سطح مرزدانهٔ هر دانه ــــ برابراست، ولی درواحد حجم ــــ برابر می‌شود.

۱۳. تغییری را که در $380°C$ در $AuCu_3$ به وجود می‌آید (مسئلهٔ ۴ـ۲ـ۶) با ذوب شدن مقایسه کنید.

۱۴. درحین انجماد آب چرا (۶ kJ/mole یا ۸۰ cal/g) انرژی حاصل می‌شود؟

۱۵. ضریب انبساط گرمایی حجمی مایع تقریباً همیشه بیشتر ازجامدآن است. چرا؟

۱۶. دمای شیشه‌ای، $T_g$ را برای کسی که این درس را نگرفته است شرح دهید.

□ ۱۷. انرژی میانگین مولکولهای گاز در این اتاق بیشتر است یا انرژی میانهٔ آنها؟

۱۸. بعد از مخلوط کردن ۱۰ گرم روغن با ۱۰۰ گرم آب چه فازهایی موجود است. با مخلوط کردن ۱۰ گرم نمك و ۱۰۰ گرم آب چطور؟ مثالی بیاورید که درآن «سیستم»

موادبا سه فاز وجود داشته باشد.

۱۹. به‌شکل ۴-۴-۱ (د) مراجعه کنید. این‌عیب بیشتر از وجود یك اتم درمحل مخصوصی درشبکهٔ fcc ، مثلا در ۱/۲، ۰، ۰ ، دیده می‌شود. دلیل آن را بنویسید.

۲۰. منظور از انرژی فعالسازی چیست؟ منظور از فازچیست؟

□ ۲۱. عبارت $D_{\circ}$ دررابطه (۴-۷-۳)، $M$ موجود دررابطهٔ (۴-۶-۳،ب) را شامل می‌شود، ولی برابر $M$ نیست. دلیل آن را بنویسید.

۲۲. چرا $T$ در روابط نوع آرنیوس دمای مطلق، K ، است؟ درمحاسبات انبساط گرمایی و رسانندگی گرمایی می‌توان $^{\circ}$C را به‌کار برد.

۲۳. با مراجعه به‌جدول ۴-۷-۱ بنویسید که چرا مقادیر ذکر شده بـرای جفت شمارهٔ ۲ بیشتر از جفت شمارهٔ ۱ است؟ بـرای جفت شمارهٔ ۲ بیشتر ازشمارهٔ ۴ ؟ برای جفت شمارهٔ ۱۱ بیشتر ازجفت شمارهٔ ۱۰؟ برای جفت شمارهٔ ۸ بیشتر ازجفت شمارهٔ ۹ ؟

□ ۲۴. سیالیت (عکس ویسکوزیته) طبق‌روابط نوع آرنیوس (روابط ۴-۶-۶ و ۴-۷-۴) با دما تغییرمی کند. این خاصیت را با مکانیسم نفوذ مقایسه کنید.

۲۵. خودنفوذی، حرکت اتمها درساختارخودشان است. شرح‌دهیدکه این‌امرچگونه اتفاق می‌افتد. بـا استفاده از ایزوتوپهای رادیواکتیو راهی پیشنهادکنید کـه بدون وجود گرادیان غلظتی بتوان آن را اندازه‌گرفت.

□ ۲۶. دربعضی موارد نفوذپذیری گرمایی $h$ ، درمحاسبات به‌جای رسانندگی گرمایی $k$ به‌کار می‌رود. در اینجا $h=k/c\rho$ . (عـوامل موجود در مخرج، ظـرفیت گرمـایـی، $c$ ، (J/g . °C) و چگالی، $\rho$ ، است) واحد $h$ چیست؟ با استفاده از روابط (۴-۸-۱ و ۴-۸-۲) رابطه‌ای برای محاسبهٔ انتقال گرما با استفاده از $h$ به‌دست‌آورید. مثالی با استفاده از یکی از این روابط ذکرکنید.

## مسائل

۴-۲-۱ آلیاژی شامل ۸۵ w/o مس و ۱۵ w/o قلع است. درصد اتمی (a/o) هر عنصر را محاسبه کنید.

جواب: ۹۱٫۴ درصد اتمی Cu ؛ ۸٫۶ درصد اتمی Sn

۴-۲-۲ ۵ a/o منیزیم درآلیاژ Al — Mg وجود دارد. درصد وزنی(w/o) منیزیم را حساب کنید.

۴-۲-۳ فرض‌کنید شکل ۴-۲-۳ محلول بین‌نشینی کربن درآهن fcc باشد. چند درصد وزنی کربن وجود دارد؟

جواب: کربن w/o ۱٫۳

۴-۲-۴ فرض کنید شکل ۴-۲-۱ محلول جامد جانشینی مس و طلا باشد. چند درصد وزنی Cu وجود دارد به‌شرط آنکه الف) اتم Cu فراگیرتر باشد؟ ب) اتم Au فراگیرتر باشد؟

**۵-۲-۴** محلول جامد جانشینی کربن درآهن bcc حاوی یك کربن در ۵۰۰ سلول واحد است. درصد وزنی (w/o) کربن چقدر است؟

جواب: ۰٫۰۲ w/o

**۶-۲-۴** آلیاژی با ۲۵ a/o طلا و ۷۵ a/o مس محلول جامد fcc را تشکیل می‌دهد که بالای ۳۸۰°C به صورت تصادفی است. زیر این دما منظم می‌شود و اتمهای طلا در گوشه‌های سلول واحد و اتمهای مس درمرکز هروجه قرارمی‌گیرند. الف) درصد وزنی طلا چقدر است. ب) کدامیك از شبکه‌های مکعبی در زیر ۳۸۰°C موجودند.

**۷-۲-۴** با مراجعه به‌مسئلهٔ (۴-۲-۶، الف)ثابت شبکهٔ آن آلیاژ را تخمین بزنید؛ ب) چگالی آن را محاسبه کنید.

جواب: الف) ۰٫۳۷۳ nm ب) ۱۲٫۴ g/cm$^3$ (= ۱۲٫۴ Mg/m$^3$)

**۸-۲-۴** سیلیسیمی که به‌عنوان نیمرسانا به‌کارمی‌رود در هرمترمکعب $10^{21}$ اتم آلومینیم دارد. الف) چند درصد وزنی Al وجود دارد؟ ب) به‌ازای هراتم آلومینیم چند سلول واحد سیلیسیم وجود دارد؟ (Si مکعبی است و در هر سلول واحد ۸ اتم دارد؛ $a =$ ۰٫۵۴۳ nm)

**۹-۲-۴** آلیاژی شامل ۸۰ w/o Ni و ۲۰ w/o Cu و به صورت محلول جامد جانشینی fcc است. چگالی این آلیاژ را محاسبه کنید.

جواب: ۸٫۹۲ g/cm$^3$ (= ۸٫۹۲ Mg/m$^3$)

۱-۳-۴ الف) درصد وزنی FeO درمحلول جامد شکل ۴-۳-۱ چقدر است؟ ب) چند درصد وزنی $Fe^{2+}$؟ ج) چند درصد وزنی $O^{2-}$ موجود است؟

جواب: الف) ۵۱ w/o ب) ۳۹٫۸ w/o ج) ۳۰٫۸ w/o

۲-۳-۴ اگر تمام یونهای آهن شکل ۴-۳-۱ به‌یونهای Ni تبدیل شوند درصد وزنی MgO چقدر می‌شود؟

**۳-۳-۴** اگر نسبت $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ برابر ۰٫۱۴ باشد، چگالی $Fe_{<1}O$ چقدر می‌شود؟ (ساختار $Fe_{<1}O$ نظیر NaCl و میانگین $(r_{Fe}+R_O)$ برابر ۰٫۲۱۵ nm است.)

جواب: ۵٫۷۳ Mg/m$^3$ (= ۵٫۷۳ g/cm$^3$)

**۴-۳-۴** ترکیب بین‌فلزی‌از آلومینیم ومنیزیم از $۵۲Mg-۴۸Al$ تا $۵۶Mg-۴۴Al$ (برمبنای وزن) تغییرمی‌کند. نسبتهای اتمی این ترکیبات چقدر است؟

**۴-۴-۱** شعاع بزرگترین اتمی را کــه می‌تواند به‌صورت بین‌نشین درآهن fcc بدون فشردن اتمها وجود داشته باشد محاسبه کنید. (راهنمایی: وجــه (۱۰۰) چند سلول واحد مجاور را نیز رسم کنید.)

جواب: ۰٫۰۵۳ nm

**۴-۴-۲** شعاع بزرگترین اتمی را که می‌تواند به‌صورت بین‌نشینی و بدون فشردن اتمها درنقرهٔ fcc جای گیرد، تعیین کنید.

**۴-۴-۳** شعاع بزرگترین اتمی را که می‌تواند به‌صورت بین‌نشین و بدون فشردن اتمها، درآهن bcc جای‌گیرد تعیین کنید.
(راهنمایی: مرکز بزرگترین حفره درنقطهٔ ۰ , ۱/۲,۱/۴ قراردارد.)

جواب: ۰٫۰۳۶ nm

**۴-۴-۴** الف) عــددکوئوردیناسیون مکان بین‌نشینی درمسئلهٔ ۴-۴-۱ چقدر است؟ ب) اگرهریك ازاین مکانها توسط اتم‌یایون کوچکتری‌اشغال شود چه‌ساختاری به‌دست می‌آید؟

**۴-۴-۵** الف) عددکوئوردیناسیون مکان بین‌نشینی در مسئلهٔ ۴-۴-۳ چقدر است؛ ب) درهرسلول واحد چندمکان بین‌نشینی وجود دارد.

جواب: الف) ۴ ب) ۱۲

**۴-۴-۶** در $۱۰۰۰^{\circ}C$، در مس بین هر ۴۷۳ مکان شبکه یك جــای خــالی وجود دارد. اگر وقتی‌کــه مس به $۲۰^{\circ}C$ می‌رسد این تهیجایها درآن بــاقی‌بمانند. چگالی مس چقدر خواهد بود؟

**۴-۴-۷** تعداد تهیجایها در دمای بالا افزایش می‌یــابد. بین $۲۰^{\circ}C$ و $۱۰۲۰^{\circ}C$، ثابت شبکهٔ فلز bcc به‌علت انبساط گرمایی $I/o$ ۰٫۵ افزایش می‌یابد. در همین گسترهٔ دمــا، چگالی ۰٫۲٪ کاهش می‌یابد. فرض‌کنید در $۲۰^{\circ}C$ درهر ۱۰۰۰ سلول واحد یك تهیجای وجود داشته باشد، تخمین‌بزنیدکه در $۱۰۲۰^{\circ}C$ درهر ۱۰۰۰سلول واحد چه‌تعداد تهیجای وجود دارد.

جواب: ۱۱ درهر ۱۰۰۰ سلول واحد

**۴-۴-۸** سطح مرزدانه درواحد حجم را برای آهن شکل ۹-۸-۲ (الف) تخمین‌بزنید. بزرگنمایی ۵۰۰ است.

**۴-۴-۹** الف) فرض کنید عدد اندازهٔ دانهٔ ۶ شکل ۴-۴-۱۱ برشی دوبعدی از جامدی چند بلوری را نشان دهد. مساحت مرزدانهٔ آن را تخمین بزنید؛ ب) مسئله را برای عدد اندازهٔ دانهٔ ۲ تکرار کنید.

جواب: الف) $۶۰ \ mm^۲/mm^۳$ ب) $۱۵ \ mm^۲/mm^۳$

**۴-۴-۱۰** الف) درهر سانتی‌متر مربع چند عدد دانه در زیرمیکروسکوپی (با بزرگنمایی $۱۰۰ \times$) برای عدد اندازهٔ دانه ۸ مشاهده می‌شود؟ ب) برای عدد اندازهٔ دانهٔ ۵ چطور؟ ج) این مسئله را برای $۲۰۰ \times$ تکرار کنید.

**۴-۴-۱۱** فرض کنید درشکل ۴-۴-۱۰ به‌جای $۲۵۰ \times$، $۱۰۰ \times$ باشد. الف) مساحت مرزدانه درهر $mm^۳$ را تخمین‌بزنید؟ ب) عدد اندازهٔ دانه را تخمین بزنید.

جواب: الف) $۱۴ \ mm^۲/mm^۳$ ب) $۳۵۰ \ in^۲/in^۳$ ج) کمی‌کمتر از۳#

**۴-۴-۱۲** دانشجویی اندازهٔ دانهٔ ASTM فلزی را ۲# به‌دست‌آورده است. ولی به اشتباه بزرگنمایی $۳۰۰ \times$ را به جای بزرگنمایی $۱۰۰ \times$ درنظرگرفته است. الف) عدد اندازهٔ دانهٔ صحیح چقدر است؟ ب) با مراجعه به شکل ۲-۸-۹ (الف) ASTM G. S. # چقدر است؟

**۴-۵-۱** چگالی آلومینیم مایع در نقطهٔ ذوب آن $۲٫۳۷ \ Mg/m^۳$ است. ثابت اندازهٔ دانه‌ای را درنظربگیرید؛ ضریب فشردگی اتمی آن را محاسبه کنید.

جواب: ۰٫۶۵

**۴-۵-۲** گرمای ذوب الف) سدیم؛ و ب) نقره را ازجدول ۴-۵-۱ تخمین‌بزنید.

**۴-۵-۳** براساس‌شیب منحنیهای‌شکل ۴-۵-۲، ضریب انبساط حجمی $\alpha_v$ را برای الف) سرب جامد؛ و ب) سرب مایع درنقطهٔ ذوب سرب تخمین بزنید.

جواب: الف) $۱۰۰ \times ۱۰^{-۶}/°C$ ب) $۱۲۰ \times ۱۰^{-۶}/°C$

**۴-۶-۱** سیمی آلومینیمی در $۳۵°C$ بین دو گیره صلب کشیده شده، سپس تا $۱۵°C$ سرد می‌شود. چه تنشی به‌وجود می‌آید؟

جواب: $۳۱ \ MPa$

**۴-۶-۲** به‌کمک داده‌های شکل ۴-۵-۲، ضریب انبساط خطی آهن bcc را در $۹۰۰°C$ به‌دست‌آورید. جواب خود را با داده‌های جدول ۱-۳-۱ مقایسه‌کنید.

**۴-۶-۳** کوارتز ($SiO_۲$) منشور شش‌بر است. مقدارمیانگین ضرایب انبساط‌گرمایی آن برابر $\alpha_a = ۱۵ \times ۱۰^{-۶}/°C$ و $\alpha_c = ۱۰ \times ۱۰^{-۶}/°C$ است. درصدانبساط حجمی بلور کوارتز بین $۲۰°C$ و $۵۷۰°C$ چقدر است؟

جواب: $\text{v/o}$ ۲٫۲

☐ ۴-۶-۴ جواب مسئلهٔ ۲-۵-۵ را رسم کنید. منحنی نقاط وسط درهٔ انرژی را به‌صورت تابعی از انرژی رسم کنید. نتایج به‌دست‌آمده را به صورت کیفی به انبساط گرمایی مربوط کنید.

۴-۶-۵ با مراجعه به‌مثال ۴-۶-۲، در چه دمایی یکی از $۱۰^۸$ اتم، انرژی کافی برای پریدن به‌خارج ازمحل خود را خواهد داشت؟

جواب: $\text{۱۰۰۰K (۷۲۷°C)}$

۴-۶-۶ با مراجعه به‌مثال ۴-۶-۲، چه‌کسری از اتمها در $\text{۱۰۰۰°C}$ انرژی‌کافی برای بیرون پریدن ازمحل خود را دارند؟

۴-۶-۷ در $\text{۸۰۰°C}$ یکی از هر $۱۰^{۱۰}$ اتم و در $\text{۹۰۰°C}$ یکی از هر $۱۰^۹$ اتم انرژی مناسب برای حرکت درجامد را دارند. الف) انرژی فعالسازی برحسب $\text{J/atom}$ چقدر است؟ ب) برحسب $\text{cal/mole}$ چقدر است؟

جواب: $\text{J/atom}$ $۰٫۲۴ \times ۱۰^{-۱۸}$ (یا $\text{۵۷۶۰۰ cal/mole}$)

۴-۶-۸ با مراجعه به مسئلهٔ ۴-۶-۷، در چه دمایی از هر $۱۰^۸$ اتم، یك اتم انرژی لازم را خواهد داشت؟

۴-۶-۹ در $\text{۵۰۰°C}$ از هر $۱۰^{۱۲}$ اتم جسم حل‌شدنی یکی انرژی‌کافی برای تغییرمکان دارد. در $\text{۱۶۰۰°C}$ این کسر به یکی از هر $۱۰^{۱۰}$ اتم، افزایش می‌یابد. الف) انرژی فعالسازی (برحسب $\text{J/atom}$ و $\text{cal/mole}$) چقدر است؟ ب) در $\text{۷۰۰°C}$ چه‌کسری، انرژی‌کافی برای تغییرمکان خواهد داشت؟

جواب: الف) $\text{J/atom}$ $۰٫۴۳ \times ۱۰^{-۱۸}$، $\text{۶۱۸۰۰ cal/mole}$ ب) $۴ \times ۱۰^{-۹}$

۴-۶-۱۰ انرژی فعالسازی لازم برای ایجاد یك تهیجای درفلز برابر $\text{۲٫۰ eV}$ (یا $\text{J}$ $۰٫۳۲ \times ۱۰^{-۱۸}$) است. در $\text{۸۰۰°C}$ به‌ازای هر $۱۰^۴$ اتم یك تهیجای وجود دارد. درچه دمایی به‌ازای هر ۱۰۰۰ اتم یك تهیجای وجود خواهد داشت؟

۴-۷-۱ محلول جامد مس درآلومینیم درنقطهٔ $X$ درهر $\text{m}^۳$، $۱۰^{۲۶}$ اتم مس و درنقطهٔ $Y$ درهر $\text{m}^۳$، $۱۰^{۲۴}$ اتم مس دارد. نقاط $X$ و $Y$، ۱۰ میکرومتر از یکدیگر دورند. در $\text{۵۰۰°C}$ شار نفوذ اتمهای مس از $X$ به $Y$ چقدر است؟

جواب: $۴ \times ۱۰^{۱۷}\,\text{atoms/m}^۲\cdot\text{sec}$

۴-۷-۲ الف) در $\text{۵۰۰°C}$ نسبت نفوذپذیری کربن درآهن bcc به‌کربن درآهن fcc

چقدر است؟ ب) در مورد نسبت کربن درآهن fcc به نیکل درآهن fcc در $۱۰۰۰^\circ C$ چطور؟ ج) درمورد کربن در آهن fcc در $۱۰۰۰^\circ C$ به کربن در آهن fcc در $۵۰۰^\circ C$ چطور؟ د) چرا نسبتها از یك بیشترند؟

**۴-۷-۳** شار اتمهای کربن در آهن fcc به طرف داخل در $۱۰۰۰^\circ C$ برابر $۱۰^{۱۹}/m^۲ \cdot sec$ است. گرادیان غلظتی آن چقدر است؟

جواب: $-۳٫۳ \times ۱۰^{۲۹}/m^۴$

**۴-۷-۴** درسطح آهن مسئله ۴-۷-۳، ۴ a/o کربن وجود دارد. درصد اتمی کربن در یك میلی‌متری زیرسطح چقدر است؟ (در $۱۰۰۰^\circ C$، $a = \sim ۰٫۳۶۵ nm$)

**۴-۷-۵** الف) با استفاده از داده‌های جدول ۴-۷-۲، نفوذپذیری مس را درآلومینیم، در $۴۰۰^\circ C$ محاسبه کنید؛ ب) صحت جواب خود را با شکل ۴-۷-۳ امتحان کنید.

جواب: $۲ \times ۱۰^{-۱۵} m^۲/sec$

**۴-۷-۶** روی به‌داخل مس می‌رود. درنقطهٔ $X$، $۲٫۵ \times ۱۰^{۱۷} Zn/mm^۳$ وجود دارد. درنقطهٔ $Y$ (در ۲ میلی‌متری $X$) چه غلظتی لازم است تا در $۳۰۰^\circ C$، $۶۰/mm^۲ \cdot min$ اتم Zn نفوذ کند.

**۴-۷-۷** درصد وزنی روی درمس درنقطهٔ $X$ مسئلهٔ ۴-۷-۶ چقدر است؟

جواب: ۰٫۳ w/o

**۴-۷-۸** گرادیان روی درآلیاژی از مس ۱۰ مرتبه بیشتر از گرادیان آلومینیم درآلیاژ دیگری از مس است. در $۵۰۰^\circ C$ شار اتمهای حل‌شونده از هر $m^۲$ در هر ثانیه را در دوآلیاژ مقایسه کنید. (داده‌های مربوط به‌نفوذپذیری Al در Cu درمثال ۴-۷-۲ آمده است.)

**۴-۷-۹** با مراجعه به مسئلهٔ ۴-۷-۱، الف) ضریب نفوذ مس درآلومینیم در $۱۰۰^\circ C$ چقدر است؟ ب) شار نفوذ اتمهای مس از $X$ به $Y$ در $۱۰۰^\circ C$ چقدر خواهد بود؟

جواب: الف) $۳ \times ۱۰^{-۲۳} m^۲/sec$ ب) $۳۰۰ atoms/mm^۲ \cdot sec$

**۴-۷-۱۰** آلومینیم می‌خواهد به‌درون تك‌بلوری ازسیلیسیم نفوذ کند. درچه دمایی ضریب نفوذ برابر $۱۰^{-۱۴} m^۲/sec$ خواهد بود؟ ($Q = ۷۳۰۰۰ cal/mole$ و $D_\circ = ۱٫۵۵ \times ۱۰^{-۴} m^۲/sec$).

**۴-۷-۱۱** منحنیهای نیکل درآهن fcc و آهن درآهن fcc شکل ۴-۷-۳ یکدیگر را قطع می‌کنند. الف) از طریق محاسبه، دمای نقطهٔ تقاطع آنها را معین کنید؛ ب) چرا

دومنحنی تقریباً منطبق‌اند؟

جواب: الف) $1200\,K \sim (900°C)$؛ جواب دقیقتر لازم نیست.

**۴-۷-۱۲** نفوذکربن در تنگستن دارای انرژی فعالسازی $0/78 \times 10^{-18} J/atom$ ($112000\, cal/mole$) و $D_0$ برابر $0/275\, m^2/sec$ است. منحنی نفوذپذیری در شکل ۴-۷-۳ درکجا واقع می‌شود؟ درمقایسه با سایر منحنیهای نفوذ کربن، چرا دراین محل قرارمی‌گیرد؟

**۴-۷-۱۳** گرادیان غلظت نیکل درآهن چقدر باید باشد تا شاری برابر $100/mm^2 \cdot sec$ اتم نیکل الف) در $1000°C$؛ ب) در $1400°C$ ایجاد شود؟

جواب: الف) $-(5 \times 10^{22}/m^3)/m$ ب) $-(7 \times 10^{20}/m^3)/m$

**۴-۷-۱۴** نفوذپذیری‌آهن (fcc)، مس و نقره را در ۶۰٪ نقطهٔ ذوب آنها، $0/6T_m$، مقایسه کنید.

☐ ۴-۸-۱ پوستهٔ کربنی‌شدهٔ فولادی(آهن fcc) درمدت یك‌ساعت در $820°C$ ($1510°F$) به‌دست آمده است. چه مدتی طول می‌کشد تا درهمین دما، ضخامت پوسته دو برابر شود.

جواب: ۴ ساعت

☐ ۴-۸-۲ پوستهٔ کربنی‌شدهٔ فولادی(آهن fcc) درمدت یك‌ساعت در $820°C$ ($1510°F$) به دست آمده است. چه مدتی طول می‌کشد تا در $850°C$ ($1560°F$) همین ضخامت را به‌دست آورد؟

☐ **۴-۸-۳** بامراجعه به‌مسئلهٔ ۴-۸-۱، الف) چه‌دمایی لازم‌است تاضخامت درمدت یك‌ساعت دوبرابر شود؟ ب) در دوساعت چطور؟

جواب: الف) $1200\,K$ ($927°C$) ب) $1144\,K$ ($871°C$)

☐ ۴-۸-۴ با مراجعه به مثال ۴-۸-۱، در $950°C$ چه تعداد ازاتمها درهردقیقه ازمیان هرسلول واحد نفوذ می‌کنند؟



# حرکت الکترون درجامدات*

## چشم‌انداز فصل

**تا اینجا اتمها و آرایش آنها را مطالعه‌کردیم؛ و اکنون دراین فصل الکترونها و چگونگی حرکت‌آنها را درمیان اتمها بررسی می‌کنیم.**

**فلزات به‌دلیل پیوند ضعیفی که در الکترونهای ظرفیتی‌دارند رسانای خوبی ازنظر الکتریسیته وگرمایند. این «رسانندگی» از آنجا ناشی می‌شود که برای تحریك و تغییرمکان الکترونهای ظرفیتی و رسیدن به‌ترازهای رسانش، انرژی اندکی کافی است. به‌عکس، در عایقها الکترونها باید از شکاف انرژی بگذرند. ازطرفی نیمرساناها شکاف انرژی کوچکی دارند درنتیجه تعداد مناسبی الکترون برای رسانش در دسترس است.**

**پس از آشنایی با شکافهای انرژی و پیوندگاهها، تصورکلی و ساده‌ای در مورد بسیاری از وسایل امکانپذیر است.**

---

* درصورت دلخواه مدرس می‌تواند این فصل را بعداً با کمترین تغییر درمیان فصلهای دیگر، تدریس‌کند. ولی با درنظرگرفتن نقشی‌که مواد الکترونی در اجتماع ما دارد لازم است‌که این فصل حتماً تدریس شود.

## هدف از مطالعه

۱. انجام محاسبات ساده برای رسانندگی براساس مفهوم الکترون به‌عنوان حامل بار منفی، و از طرف دیگر الکترون کم شده که حفرهٔ الکترونی نامیده می‌شود و حامل بار مثبت است.

۲. ارتباط دادن تغییرات مقاومت ویژه (و رسانندگی) به اثر ناخالصیها و تغییرات دما توسط میانگین مسیر آزاد. (بدین‌وسیله می‌توان اثر کار سرد را روی مقاومت ویژه درفصل ۶ برآورد کرد.)

۳. مربوط کردن باندهای انرژی و شکافهای انرژی ازنظر کیفی به رسانندگی فلزات، نیمرسانا و عایقها.

۴. حل مسائل مقدماتی الف) درمورد رسانندگی نیمرساناهای ذاتی براساس تحرک بار و اندازهٔ شکاف انرژی آنها؛ ب) درمورد رسانندگی نیمرساناهای خارجی براساس افزودن ناخالصی پیش‌بینی شده؛ و ج) در مورد پیشروی باز ترکیب براساس زمان توقف.

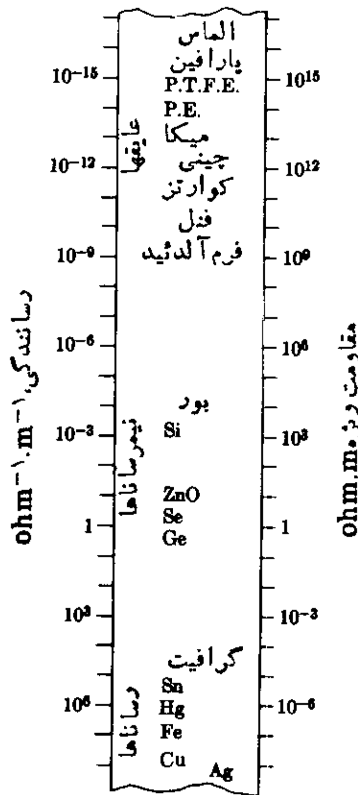
۵. درک اصول وسایل ساخته شده از نیمرساناها، مثل ترمیستور، رسانای نوری، L. E. D.، و یکسوکنندهٔ پیوندی.

۶. آشنایی کافی با واژه‌هایی که در مواد الکترونی به‌کار رفته است، تا در صورت لزوم بامهندسان طراح ارتباط برقرار شود.

اگر مطالعهٔ بخشهای ۱ــ۳ و ۱ــ۴ را به بعد موکول کرده‌اید، اکنون به آنها مراجعه کنید. بارالکترونی دراین‌بخش کاربرد زیادی دارد، بنابراین پیشنهاد می‌شود مقدار آن را یاد بگیرید ($q = 0.16 \times 10^{-18}\ \mathrm{A \cdot s}$). رابطهٔ آرنیوس فصل ۴ در این‌فصل نیز آمده است.

## ۵-۱ حاملهای بار الکتریکی

مواد مختلفی که توسط مهندسان و دانشورزان به‌کار می‌روند گسترهٔ وسیعی از رسانندگی (یا چون $\sigma = 1/\rho$، مقاومت ویژه) را می‌پوشانند. طبق شکل ۵ــ۱ــ۱ این مواد معمولاً به سه دسته تقسیم می‌شوند: رساناها، نیمرساناها، و عایقها. در این دسته‌بندی فلزات که الکترون آزاد و متحرک دارند در گروه نخست قرار می‌گیرند (بخشهای ۲ــ۲ و ۲ــ۷). مواد سرامیکی و پلی‌مری که الکترونهای آنها محکم نگه‌داشته شده است و یونهای آنها نمی‌توانند نفوذ کنند، در دستهٔ عایقها قرار گرفته‌اند. تاچندی پیش‌فقط دوانتهای طیف شکل ۵ــ۱ــ۱ را مفید می‌دانستند ولی گروه‌سوم یعنی نیمرساناها که بعداً شناخته شدند اهمیت روزافزونی پیدا کرده‌اند و در واقع بحث اصلی این فصل را تشکیل می‌دهند.




**شکل ۵-۱-۱** طیف رسانندگی (و مقاومت ویژه). نیمرساناهـای متداول بین $10^{+4}$ تا $10^{-4}\Omega^{-1}.m^{-1}$ قرار دارند.

درآن نوع از مواد که رسانای الکتریسته‌اند بـار الکتریکی به‌صورت مضربی از $0/16 \times 10^{-18}$ کولن، که بار یك الکترون است حمل می‌شود. در فلزات، الکترونهایند که به‌طور جداگانه حرکت می‌کنند. درمواد یونی بارالکتریکی به‌وسیلهٔ یونهای نفوذکننده حمل می‌شود. ولی مقدار بار برابر بامضرب صحیحی از بارالکترون است (برای آنیونها منفی وبرای کاتیونها مثبت). بنابراین هریون $SO_4^{2-}$ در باتری باری معادل $0/32 \times 10^{-18}$ کولن را حمل می‌کند، و هریون $Pb^{2+}$ باری معادل دوالکترون، کم‌دارد و درجهت مخالف حرکت می‌کند.

الکترونها و آنیونها حامل بار منفی‌اند. در مقابل، کاتیونها مانند $Pb^{2+}$ حامل بار مثبت به‌شمار می‌آیند زیرا درآنها کمبود الکترون‌وجود دارد. نوع دیگری حامل بارمثبت وجود دارد که در نیمرساناها اهمیت بسیار دارد، این حامل بار مثبت، حفرهٔ الکترونی نام دارد که در واقع جای خالی شدهٔ الکترون تغییر مکان یافته دربـاند انرژی‌است. این‌مطلب دربخش ۵-۴ نیز موردبحث قرار خواهد گرفت.

مقادیر رسانندگی $\sigma$ و مقاومت ویژهٔ $\rho$ برای هرماده، به‌تعداد حاملهای بار $n$، و بار هریك از حاملها $q$ و تحرك آنها $\mu$ طبق رابطهٔ (۱-۴-۱، الف) بستگی دارد

$$\sigma=\frac{1}{\rho}=nq\mu \qquad (۵-۱-۱)$$

مانند فصل ۱، واحدهای $n$، $q$ و $\mu$ به‌ترتیب $m^{-3}$، کولن، و $m^2/V.s$ است.*

دراین‌فصل عوامل اتمی و ساختاری راکه‌روی مقادیر $n$ و $\mu$ مؤثرند بررسی خواهیم کرد تا بتوانیم عواملی را پیش‌بینی کنیم که در انتخاب مواد برای طراحی یا رفتار ضمن کار مؤثرند.

سرعت رانشی، $\bar{v}$، حامل بار را می‌توان از رابطه (۱-۴-۲) به‌دست‌آورد

$$\bar{v}=\mu\mathcal{E} \qquad (۵-۱-۲)$$

یادآور می‌شود که سرعت رانش به میدان الکتریکی $\mathcal{E}$ با V/m بستگی دارد. بنابراین اگر اختلاف پتانسیلی وجود نداشته باشد سرعت منتجه یا سرعت رانش وجود نخواهد داشت. این امر بدان معنی نیست‌که ذرات باردار حرکت نمی‌کنند، بلکه حرکات تصادفی‌اند وبنابراین‌حاملهای بار دریك‌جهت، با بار حمل شونده درجهت مخالف متوازن می‌شوند.

**مثال ۵-۱-۱** مقاومت ویژه نوعی نیمرسانا که در هرمترمکعب $۱۰^{۲۱}$ حامل بار دارد در ۲۰°C برابر با ۰٫۱ Ω . m است. اگر در گرادیان ۰٫۱۵V/mm یك آمپر جریان حمل‌شود سرعت رانش الکترونها چقدر است؟

حل: با استفاده از روابط (۵-۱-۱) و (۵-۱-۲)

$$\bar{v}=\mathcal{E}/\rho nq$$

$$=\frac{(۱۵۰\ V/m)}{(۰٫۱\ \Omega\ .\ m)(۱۰^{۲۱}/m^{۳})(۰٫۱۶\times ۱۰^{-۱۸} amp\ .\ sec)}=۹٫۴\ m/sec$$

(۵-۱-۳)

توضیح. از روابط (۱-۴-۲) و (۵-۱-۲) درمی‌یابیم‌که تحرك حاملهای بار در این ماده طبق روابط (۱-۴-۲) و (۵-۱-۲)، (m/sec) (V/m) ۰٫۰۶۲۵ خواهد بود. ▲

---

* اگر بخش ۱-۴ را قبلا مطالعه نکرده‌اید، اکنون توصیه می‌شود به‌عنوان مرور خواص مقدماتی الکتریکی به‌آن مراجعه کنید.

## ۵-۲ رسانندگی فلزی

در بخش ۲-۲ پیوند فلزی را براساس الکترونهای آزاد شرح دادیم. بهویژه الکترونهای ظرفیتی می‌توانند مانند امواج ساکن آزادانه در فلز حرکت کنند. بنابراین بدون وجود میدان الکتریکی، انتقال بار منتجه‌ای وجود نخواهد داشت.

اگر فلز در مدار الکتریکی قرار گیرد، الکترونها به‌طرف الکترود مثبت می‌روند و با کسب انرژی بیشتری، درآن جهت سرعت می‌گیرند. به‌عکس، الکترونهایی که به‌طرف الکترود منفی‌می‌روند انرژی و سرعت خود را کاهش‌می‌دهند. درنتیجه سرعت رانش‌موجود در رابطهٔ (۵-۱-۲) به‌وجود می‌آید.

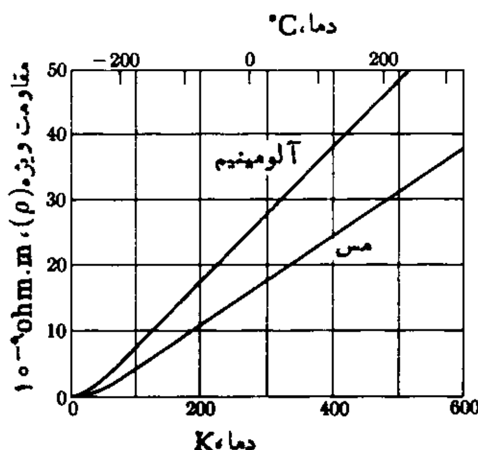
**میانگین‌مسیرآزاد.** امواج بدون توقف از میان ساختارهای متناوب حرکت‌می‌کنند. بلور منظم (فصل۳) یکی ازمعمولترین ساختارهای‌متناوب موجوداست. بنابراین شبکه‌های‌بلوری فلزات، محیط کاملا مناسبی برای حرکت الکترونها محسوب می‌شود. با این‌حال هر نوع بی‌نظمی در ساختارهای تکرار شونده‌ای که موج از میان‌آنها عبور می‌کند می‌تواند موج متحرك رامنحرف کند. به‌این ترتیب هرگاه الکترونی که‌به‌طرف الکترود مثبت درحرکت است منحرف شود، ازآن پس در آن جهت دیگر سرعت افزایش نخواهد یافت. نتیجهٔ امر، کاهش سرعت رانش است حتی اگرمیدان الکتریکی تغییر نکرده باشد. به‌طورخلاصه باید گفت بی‌نظمیهای شبکهٔ‌بلوری تحرك را در رابطهٔ (۵-۱-۲) کاهش می‌دهند؛ درنتیجه رسانندگی کم و مقاومت ویژه زیاد می‌شود.

میانگین فاصله‌ای را کـه الکترون در حرکت مـوجی بدون انحراف طی مـی‌کند میانگین مسیرآزاد گویند. برای آنکه روشن‌شود که‌چرا فلزات‌مقاومت ویژهٔ یکسان‌ندارند بایدبی‌نظمیهایی که حرکت‌الکترونی را منحرف می‌کنند شناخته شوند. باتوجه به فصل ۴ دوائر قابل‌تشخیص است.

**مقاومت ویژه برحسب‌دما.** مقاومت ویژهٔ فلزات با دما افزایش می‌یابد (شکل ۵-۲-۱) و این افزایش (بجز درصفرمطلق و نزدیك‌آن) تقریباً خطی‌است. از آنجایی‌که درفلزات* دلیلی در دست نیست که در رابطهٔ (۵-۱-۱)، با افزایش دما $n$ کاهش یابد، باید به‌تحرك $\mu$ توجه‌کرد. افزایش‌مقدار ارتعاشات گرمایی باافزایش‌دما متناسب‌است (بجز در دماهای بسیار پایین) و موجب کم‌کردن نظم‌بلور و کاهش میانگین مسیرآزاد می‌شود کـه درنتیجه تحرك الکترونهـا در فلز کـم خواهد شد. تغییر مقاومت ویژهٔ حـاصل هنگام طرح ابزار الکتریکی بسیارمهم‌است، دربرخی موارد برای اجتناب ازحساسیت ناخواستهٔ مدار نسبت به‌دما باید مراقبتهایی انجام شود. درموارد دیگر، این حساسیت به‌دما را می‌توان به‌عنوان یك «ترمز» مفیدبه‌کاربرد. مثال ۵-۲-۳ این‌پدیده را دریك وسیلهٔ الکتریکی (برشته‌کنندهٔ

---

* در نیمرساناها با زیاد شدن دما تعداد حاملهای بار افزایش می‌یابد (بخش ۵-۴).




**شکل ۵-۲-۱** مقاومت ویژه برحسب دما (درفلزات). درشرایط عـادی، مقاومت ویژهٔ فلزات باتغییر دما به‌طور خطی تغییر می‌کند.

نان) مشخص می‌کند.

با استفاده ازضریب‌گرمایی مقاومت $y_T$ می‌توان مقاومت‌ویژه را برحسب دما به‌صورت زیر بیان کرد

$$\rho_T = \rho_{\circ °C}(1 + y_T \Delta T) \qquad (۵-۲-۱)^*$$

دراین‌رابطه $\rho_{\circ C}$ مقاومت‌ویژه درصفر درجهٔ سانتی‌گراد و $\Delta T$ برابر $(T - \circ °C)$ است. مقدار ضریب گرمایی‌مقاومت‌برای فلزات‌خالص‌حدود ۰٫۰۰۴/°C است (جدول ۵-۲-۱). این‌مقدار نشان‌می‌دهد که میانگین مسیر آزاد الکترونها بین‌صفر تا ۲۵۰°C، نصف‌می‌شود.

**مقاومت ویژه در محلولهای جامد.** عامل دیگری که می‌تواند میانگین مسیر آزاد را در فلزات کاهش دهد وجود اتمهای جسم حل‌شدنی در شبکه است، مقاومت ویژهٔ محلول جامد آلیاژی همواره از فلزات خالص سازندهٔ آن بیشتر است.**

دلیل این‌امر آن است‌که الکترون هنگام نزدیک‌شدن به‌این ناخالصی اتمی با نوعی بی‌نظمی درمیدان‌الکتریکی‌مواجه می‌شود. در درجهٔ اول در آلیاژی مثل‌برنج شبکهٔ بلوری اندکی اعـوجاج دارد زیرا شعاع اتمهای مس و روی چند درصد باهم اختلاف دارنـد، به‌علاوه مس ۲۹ پروتون و روی ۳۰ پروتـون دارد. این نیز میدان موضعی را تحت تأثیر

---

* کاهش مقاومت ویژه (افزایش رسانندگی) مورد بحث به‌ابر رسانندگی که در نزدیکی صفر مطلق ظاهر می‌شود، مربوط نمی‌شود. آن شامل پدیـدهٔ دیگری (مکانیك کوانتومی) است که در محدودهٔ این‌کتاب نیست.

** داده‌ها را برای فلزات و آلیاژها در جدول ۵-۲-۱ یا پیوست (ج) بررسی کنید.

جدول ۵-۲-۱ ضرایب گرمایی مقاومت ویژه

| فلز | مقاومت ویژهٔ در $0°C$ * ohm·nm | ضریب گرمایی مقاومت ویژه، $y_T$، $°C^{-1}$ |
|---|---|---|
| آلومینیم | ۲۷ | ۰٫۰۰۳۹ |
| مس | ۱۶ | ۰٫۰۰۳۹ |
| طلا | ۲۳ | ۰٫۰۰۳۴ |
| آهن | ۹۰ | ۰٫۰۰۴۵ |
| سرب | ۱۹۰ | ۰٫۰۰۳۹ |
| منیزیم | ۴۲ | ۰٫۰۰۴ |
| نیکل | ۶۹ | ۰٫۰۰۶ |
| نقره | ۱۵ | ۰٫۰۰۳۸ |
| تنگستن | ۵۰ | ۰٫۰۰۴۵ |
| روی | ۵۳ | ۰٫۰۰۳۷ |
| برنج (Cu–Zn) | ~ ۶۰ | ۰٫۰۰۲ |
| مفرغ (Cu–Sn) | ~ ۱۰۰ | ۰٫۰۰۱ |
| کنستانتان (Cu–Ni) | ~ ۵۰۰ | ۰٫۰۰۰۰۱ |
| مونل (Ni–Cu) | ~ ۴۵۰ | ۰٫۰۰۲ |
| نیکروم (Ni–Cr) | ~ ۱۰۰۰ | ۰٫۰۰۰۴ |

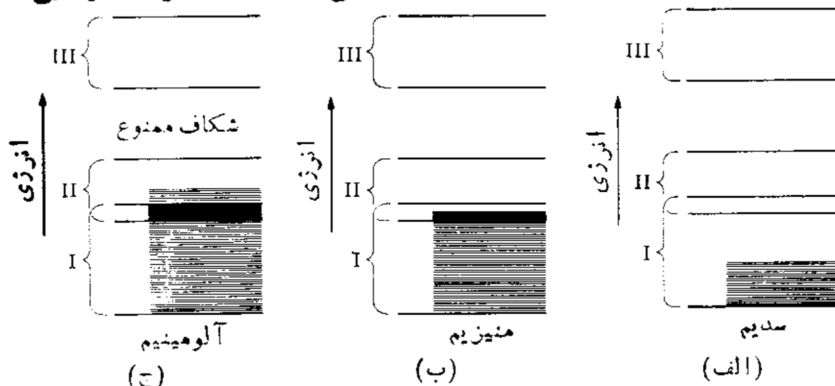
* داده‌های مربوط به‌فلزات و آلیاژها را درجدول ۵-۲-۱ یا پیوست (ج) بررسی کنید.

قرار می‌دهد. با وجـود آنکه این اختلافات به‌نظر جزئی می‌آیند، الکترونها را منحرف مـی‌کنند و میانگین مسیر آزاد را کـاهش مـی‌دهند. از آنجا کـه مقاومت ویـژهٔ برنج ($70Cu-30Zn$) سه‌تاچهار برابر مس‌خالص‌است می‌توان گفت میانگین مـسیر آزاد برای الکترونها در برنج ۲۵ تا ۳۰٪ مس‌خالص است. بنا براین درطرحهایی کـه‌کاهش ضریب ویژه اشکال دارد به‌ناچار باید از فلزات خالص استفاده‌کرد (بخش ۶-۱).

**باندهای انرژی.** از (شکل ۲–۲–۷) به‌یاد بیاورید کـه الکترونهای اتمهای تکی فقط اربیتال یا تراز انرژی مشخصی‌را اشغال‌می‌کنند و بین این‌ترازها شکافهای انرژی ممنوعی وجود دارند. اطراف هر اتم، الکترونها امـواج ساکن پدید می‌آورند و این الگو برای الکترونهای داخلی یا غیرظرفیتی نیزصادق است، با این تفاوت‌کـه الکترونهـای آخرین مدار یا ظرفیتی هنگامی که تعداد زیادی اتم کوئوردینانس شده داشته باشیم، ازجـا کنده می‌شوند. بنابراین اربیتالهای ظرفیتی، یك باند تشکیل مـی‌دهند [شکل ۲–۲–۷(ب)] و موج‌ساکن‌تحت‌تأثیر تمام‌اتمهای موجودخواهد بود. درنتیجه‌هر باند تعداد زیادی‌ترازهای انرژی جدا ازهم را شامل می‌شود که تعداد این‌ترازها برابر بـا تعداد اتمهای موجود در سیستم خواهد بود. چـون تعداد آنهـا فوق‌العاده زیاد است و باندهـای انرژی تنها چند الکترون‌ولت پهنادارند می‌توان گفت ترازهای انرژی درهر باند به‌فواصل بینهایت‌کوچك ازهم قرار گرفته‌اند به‌طوری‌که باند انرژی پیوسته فرض می‌شود.

بنابر یك اصل فیزیکی*، تنها دوالکترون‌می‌توانند دریك تراز انرژی باشند (و این دو نیز باید چرخش مغناطیسی عکس هم داشته باشند). بنابراین بـا این تعداد ترازها، هر باندمی‌تواند دوبرابر تعداد اتمهای موجود، الکترون دربرگیرد. درنتیجه درفلزات یك‌ظرفیتی مثل سدیم تنها نصف‌باند ظرفیتی پرمی‌شود [شکل ۵–۲–۲ (الف)]. ازآنجا که آلومینیم در هر اتـم سه‌الکترون ظرفیتی دارد، بـاند ظرفیتی اول آن پروباند دوم نیمه‌پـر است [شکل ۵–۲–۲(ج)]. طبیعی است درهر باند ابتدا ترازهای انرژی پایینتر پر می‌شوند.

**تعریف رسانای فلزی.** در بخش ۲–۷ گفته‌شدکه‌یکی از مشخصات فلزات «توانایی آنها




**شکل ۵–۲–۲** باندهای انرژی. الف) سدیم. با یك الکترون ظرفیتی در هر اتم، تنها نیمی از باند ظرفیتی‌آن پرمی‌شود (I)؛ ب) منیزیم. باند اول آن پرمی‌شود، بجزآنکه باند دوم (II) همپوشانی داشته باشد تا تعدادی الکترون را دربرگیرد، ج) آلومینیم. با سه‌الکترون ظرفیتی، نخستین باند را پر و دومی را نیمه پرمی‌کند. تمام این فلزات درقسمت بالایی باندهای ظرفیتی خود، ترازهای خالی دارند.

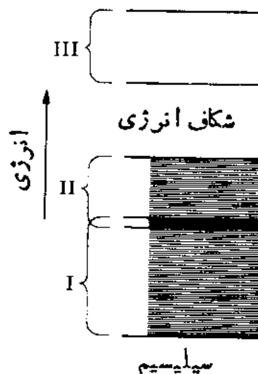
* اصل پائولی.

برای از دست دادن الکترون ظرفیتی» است و ذکر شد که به‌همین دلیل فلزات رسانایند.
اکنون به‌تعریف بهتری از رساناهای فلزی می‌پردازیم که عبارت است از داشتن باندهای ظرفیتی پر نشده. شکلهای ۵-۲-۲ (الف) و (ج) طرحوارهٔ این مطلب را برای سدیم و آلومینیم نشان می‌دهند.

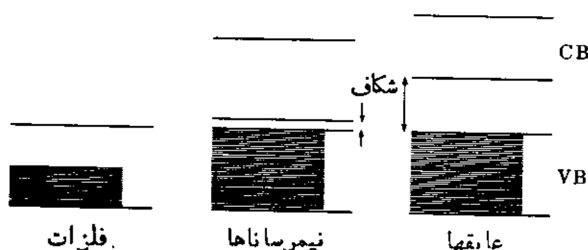
ترازهای انرژی خالی در یك باند به‌این دلیل برای رسانش اهمیت دارند که در هنگام حرکت الکترون به‌سمت الکترود مثبت انتقال آن را به تراز بالاتر میسر می‌سازند. اگر باند انرژی کاملاً پرشده باشد وشکاف انرژی ممنوع موجود باشد این‌امر امکان نخواهد داشت.

درمورد منیزیم که در هر اتم دوالکترون ظرفیتی دارد انتظار می‌رودکه نخستین باند ظرفیتی پرشده باشد. همین حالت وجود دارد، ولی باندهای اول و دوم همپوشانی دارند [شکل ۵-۲-۲ (ب)]. بنابراین بعضی‌از الکترونهای $2N$ (که درآن $N$ تعداد اتمهاست) درباند دوم نیز قرار می‌گیرند به‌طوری‌که تعدادی درتراز خالی می‌مانند تا الکترونهای شتابدار را دریافت کنند. درنتیجه منیزیم خاصیت فلزی دارد.

اما سیلیسیم درهراتم چهار الکترون ظرفیتی داردکه دوباند ظرفیتی اول را کاملا پرمی‌کنند (شکل ۵-۲-۳) به‌علاوه چون بالای باند دوم‌شکاف انرژی ممنوع وجود دارد الکترونها نمی‌توانند به باند بعدی صعود کنند و شکاف بزرگی در زیر تراز انرژی سومین باند (III) وجود دارد. سیلیسیم رسانای‌فلزی محسوب نمی‌شود (در $20^\circ C$ مقاومت ویژهٔ مس $17 \times 10^{-9} \text{ ohm . m}$ و مقاومت ویژهٔ سیلیسیم $2 \times 10^{3} \text{ ohm . m}$ نسبتی‌حدود $10^{11}$ دارد). در دوبخش بعد خواهیم دیدکه تفاوت عایقها و نیمرساناها مربوط به‌اندازهٔ شکاف انرژی، $E_g$، است که بین باندهـای ظرفیتی پرشده واقـع است (شکل ۵-۲-۴). سیلیسیم یك نیمرساناست (شکل ۵-۱-۱)؛ زیرا اندازهٔ شکاف انرژی درآن چنان است




**شکل ۵-۲-۳** شکاف انرژی (درسیلیسیم). چهارالکترون ظرفیتی دراتم سیلیسیم دو باند نخست انرژی را پرمی‌کنند. بین‌باند دوم و سوم شکاف ممنوعی وجود دارد.




**شکل ۵-۲-۴** فلزات، نیمرسانا، عایقها. فلزات باندهای انرژی پرنشده دارند، نیمرساناها بالای باند ظرفیتی پرشده (VB) شکاف ممنوع کوچکی که تنها تعدادی الکترون می‌توانند «از شکاف بگذرند» و به باند رسانش (CB) برسند. عایقها شکاف انرژی بزرگی دارندکه مانع عبور الکترونهاست.

که تنها الکترونهای پر انرژی می‌توانند «از شکاف بگذرند» و به باند رسانش برسند (بخش ۵-۴).

**مثال ۵-۲-۱** مقاومت ویژهٔ نقره را در $-۴۰°C$ حساب کنید.

حل: ازجدول ۵-۲-۱، $y_T = ۰٫۰۰۳۸/°C$ و $\rho = ۱۵\ ohm \cdot nm$ در $۰°C$

$$\rho_{-۴۰°C} = ۱۵\ ohm \cdot nm[۱ + (۰٫۰۰۳۸/°C)(-۴۰°C)]$$

$$= ۱۳\ ohm \cdot nm \qquad ▲$$

**مثال ۵-۲-۲** بدون درنظرگرفتن دما، هر درصد اتمی قلع مقاومت ویژهٔ مس را $۳۰\ ohm \cdot nm$ افزایش می‌دهد. مقاومت ویژهٔ آلیاژی حاوی $۹۹\ Cu-۱Sn$ (درصد وزنی) در $۱۰۰°C$ چقدر است؟

حل: مبنا: $۱۰۰\ amu$

$$Sn: \frac{۱amu}{۱۱۸٫۷ amu/atom} = ۰٫۰۰۸۴ = ۰٫۵۴ a/o$$

$$Cu: \frac{۹۹\ amu}{۶۳٫۵۴} \qquad \frac{= ۱٫۵۵۸۱}{۱٫۵۶۶۵}$$

مجموع مقاومتهای ویژهٔ آلیاژ و دما برابر است با

$$\rho=(۰٫۵۲\ a/o)(۲۰\ ohm\cdot nm\ per\ a/o)$$

$$+۱۶\ ohm\cdot nm[۱+(۰٫۰۰۳۹/^{\circ}C)(۱۰۰^{\circ}C)]$$

$$=۳۸\ ohm\cdot nm \quad (\text{یا}\ ۳۸\times۱۰^{-۹}\ ohm\cdot m)$$

توضیح. افزایش مقاومت ویژه برحسب ترکیب درغلظتهای کم جسم حل‌شدنی، تقریباً خطی است. ▲

**مثال ۵-۲-۳** نوعی برشته‌کنندهٔ نان‌که به‌برق ۱۱۰ ولتی متصل است هنگامی‌که سیم مقاومت آن ازجنس نیکروم باشد در $۸۷۰^{\circ}C$، ۳۰۰ وات مصرف می‌کند الف) وقتی‌که گرم است جریان مصرفی چقدر است؟ ب) بلافاصله پس از روشن‌کردن (در $۲۰^{\circ}C$) جریان چقدر است؟

حل:

الف)
$$I=\frac{۳۰۰W}{۱۱۰V}=۲٫۷\ A$$

ب)
$$R_{۸۷۰^{\circ}C}=\frac{۱۱۰V}{۲٫۷A}=۴۰\ \Omega$$

ازآنجا که تغییر بعدکم (و نسبتاً قابل اغماض) است

$$\frac{R_{۲۰^{\circ}C}}{R_{۸۷۰^{\circ}C}}=\frac{\rho_{۲۰^{\circ}C}}{\rho_{۸۷۰^{\circ}C}}$$

از رابطهٔ (۵-۲-۱) و جدول ۵-۲-۱ داریم

$$R_{۲۰}=R_{۸۷۰}\left[\frac{\rho_{\circ}(۱+y_{T}۲۰^{\circ}C)}{\rho_{\circ}(۱+y_{T}۸۷۰^{\circ}C)}\right]$$

$$=۴۰\ \Omega\ \frac{۱+۰٫۰۰۰۴(۲۰)}{۱+۰٫۰۰۰۴(۸۷۰)}$$

$$=۴۰\ \Omega\left[\frac{۱٫۰۰۸}{۱٫۳۵}\right]=۳۰\ \Omega$$

$$I_{۲۰}=\frac{۱۱۰V}{۳۰\Omega}=۳٫۷A$$

توضیح. اگر جریان ۳٫۷ آمپر ادامه یابد دما از $870°C$ بالاتر می‌رود و موجب اکسایش بیشتر و خرابی می‌شود.

باید دانست که ضریب گرمایی مقاومت ویژه در آلیاژها کمتر از فلزات خالص است، زیرا میانگین مسیر آزاد الکترونها در آلیاژ از ابتدا کم و مقاومت ویژه زیادتر است. ▲

## ۵-۳ عایقها

با توجه به باندهای انرژی، عایق را می‌توان ماده‌ای دانست که بین بالاترین باند تراز ظرفیتی پرشده و باند خالی بعدی شکاف انرژی بزرگی دارد (شکل ۵-۲-۴). اندازهٔ این شکاف آن‌قدر بزرگ است که در تمام موارد مانع از عبور الکترونها می‌شود و آنها را در باند پایینتر نگه می‌دارد. عدد $n$ آنها در باند رسانش در رابطهٔ (۵-۱-۱) فوق‌العاده کم است.

معمولاً برای توصیف الکترونهای ظرفیتی گفته می‌شود که آنها با یونهای منفی پیوند دارند (یا در پیوند اشتراکی شرکت دارند). در NaCl برای جدا کردن یك الکترون از $Cl^-$ حدود ۷ الکترون‌ولت ($1{,}1 \times 10^{-18}\,J =$) و در الماس برای جدا کردن یك الکترون از پیوند اشتراکی آن تقریباً ۶ الکترون ولت انرژی لازم است. این انرژیهای فعالسازی ۷ eV و ۶ eV در واقع اندازهٔ شکافهای انرژی محسوب می‌شوند و آنها را می‌توان با سیلیسیم (۱٫۱ eV) و ژرمانیم (۰٫۷ eV) که در بخش بعد آمده است مقایسه کرد. در فیزیك مرز جدایی بین عایق و نیمرسانا جایی فرض می‌شود که شکاف انرژی حدود ۴ eV ($0{,}64 \times 10^{-18}\,J$) باشد. به‌این‌ترتیب NaCl و الماس، عایقهای برف و سیلیسیم و ژرمانیم نیمرسانا به‌شمار می‌آیند* (شکل ۵-۱-۱).

**مثال ۵-۳-۱** بین دو صفحهٔ الکترود که ولتاژ ۱۱۰ ولت بین آنها برقرار است، لایه‌ای از پلی‌اتیلن به‌ضخامت ۰٫۱ mm به عنوان دی‌الکتریك به‌کار رفته است. براساس شکل ۵-۱-۱ شار الکترون از این لایه چقدر است؟

حل: مبنا $= 1\,m^2$ و $1\,sec$

$$R = \frac{(10^{14}\,\Omega \cdot m)(10^{-4}\,m)}{(1\,m^2)} = 10^{10}\,\Omega$$

$$I = \frac{110\,V}{10^{10}\,\Omega} = 11 \times 10^{-9}\,A$$

---

* الماس اگر ناخالصی داشته باشد می‌تواند نیمرسانا باشد همچنین در شرایط مناسب برای نفوذ سدیم، NaCl نیز نیمرسانای یونی خواهد بود.

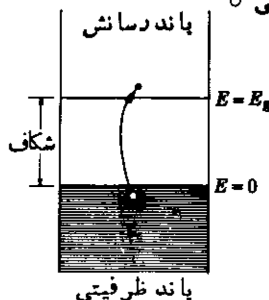
$$\frac{(11 \times 10^{-9} A/m^2)}{(0.16 \times 10^{-18} A \cdot sec/\text{الکترون})} = 7 \times 10^{10} \text{الکترون}/sec \cdot m^2$$

توضیح. جریان حاصل، کوچك اما قابل اندازه گیری است. در اندازه گیری، عواملی مانند ناخالصیها، تخلخلهای سوزنی، و نشت سطحی نیز باید در نظر گرفته شوند. ▲

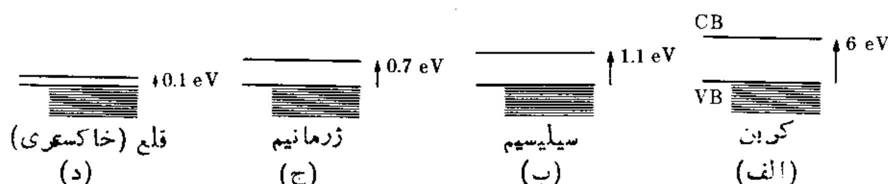
## ۵-۴ نیمرساناهای ذاتی

تفاوت بین نیمرساناها و عایقها در اندازهٔ شکافهای انرژی ممنوع آنهاست (شکل ۵-۲-۴). در نیمرساناها شکاف انرژی به گونه‌ای است که تعداد معینی الکترون می‌توانند از باند ظرفیتی پر به باند خالی رسانش برسند (شکل ۵-۴-۱). این الکترونها ضمن حرکت به طرف الکترود مثبت، انرژی بیشتری کسب می کنند. به‌علاوه حفره‌های الکترونی که به این ترتیب در باند ظرفیتی ایجاد شده‌اند موجب رسانش می‌شوند زیرا الکترونهای باندهای پایینتر خواهند توانست با کسب انرژی به این ترازهای خالی‌شده، برسند.

شکل ۵-۴-۲ نمودار طرحوار میزان شکاف انرژی در C (الماس)، Si، Ge و Sn (خاکستری) است. در الماس این شکاف بزرگتر از آن است که تعداد قابل ملاحظه‌ای الکترون بتوانند از آن عبور کنند، بنابراین الماس عایق محسوب می‌شود (جدول ۵-۴-۱). با پایین آمدن از گروه IV جدول تناوبی و رسیدن به سیلیسیم، ژرمانیم و قلع تعداد حاملهای بار افزایش می‌یابد، در نتیجه رسانندگی طبق جدول مذکور بیشتر می‌شود. این رسانندگی از مشخصات ذاتی این مواد است، و از ناخالصیها ناشی نمی‌شود. در نتیجه نیمرسانندگی ذاتی نامیده می‌شود.




**شکل ۵-۴-۱** در نیمرساناها تعداد قابل توجهی از الکترونهای ظرفیتی می‌توانند از شکاف انرژی ممنوع بگذرند و الکترون، حامل بار منفی در باند رسانش است. حفرهٔ الکترونی، حامل بار مثبت در باند ظرفیتی است.



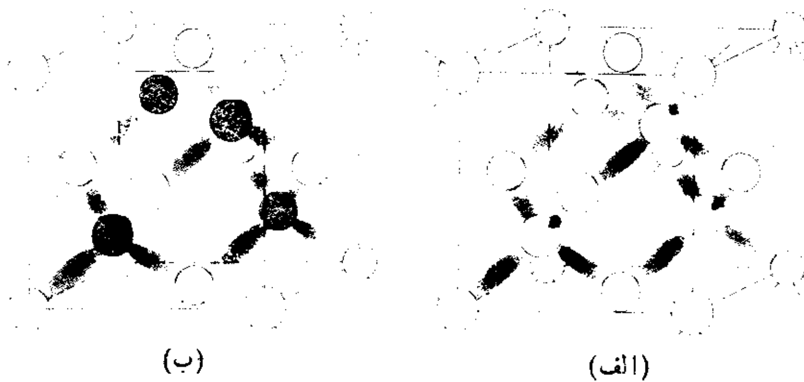

**شکل ۵-۴-۲** شکاف انرژی درعناصر گروه IV (طرحوار). تمام این عناصر می‌توانند ساختار یکسان داشته باشند و همگی باندهای پرشده دارند. دراین‌میان قلع که کوچکترین شکاف انرژی را دارد در دمای معمولی بیشترین الکترون‌را در باند رسانش (CB) دارد، وبنا براین رسانندگی آن ازهمه بیشتر است. (به‌جدول ۵-۴-۱ رجوع کنید).

**جدول ۵-۴-۱** شکافهای انرژی درعناصر نیمرسانا

| عنصر | شکاف انرژی $E_g$ $۱۰^{-۱۸}$ J | شکاف انرژی $E_g$ eV | در ۲۰°C (۶۸°F): کسرالکترونهای‌ظرفیتی با انرژی $> E_g$ | در ۲۰°C (۶۸°F): رسانندگی σ، $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ |
|---|---|---|---|---|
| C (الماس) | ۰٫۹۶ | ~۶ | $\sim ۱/۳۰ \times ۱۰^{۲۱}$ | $< ۱۰^{-۱۶}$ |
| Si | ۰٫۱۷۶ | ۱٫۱ | $\sim ۱/۱۰^{۱۳}$ | $۵ \times ۱۰^{-۴}$ |
| Ge | ۰٫۱۱۲ | ۰٫۷ | $\sim ۱/۱۰^{۱۰}$ | ۲ |
| Sn (خاکستری) | ۰٫۰۱۶ | ۰٫۱ | $\sim ۱/۵۰۰۰$ | $۱۰^{۶}$ |

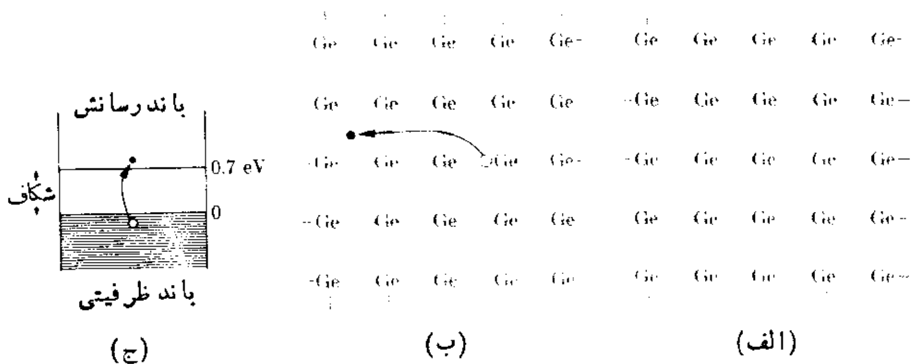
ساختار بلوری الماس بار دیگر درشکل ۵-۴-۳ (الف) تکرار شده است (قبلا در فصل ۲ آمده‌بود). هر اتم کربن دارای عدد کوئوردیناسیون ۴ است و هرجفت اتم‌همسایه، یك جفت الکترون به‌اشتراك گذاشته‌اند (بخش ۲-۲). سیلیسیم، ژرمانیم، و قلع‌خاکستری نیـز چنین ساختاری دارند.* شکل ۵-۴-۴ بـا استفاده از ژرمـانیم طرحوارهٔ مکانیسم نیمرسانندگی‌را در این عناصر نشان می‌دهد.

* قلع سفید یکی از معروفترین چندشکلیهاست. بالای ۱۳°C پایدار است (ولی می‌توان آن را تا دمای کمتری نیز فوق سردکرد) چگالی قلع سفید (bct) بیشتر از قلع خاکستری است. ($\rho_w = ۷٫۳$ Mg/m³ $= ۷٫۳$ g/cm³ ، درحالی که $\rho_g = ۵٫۷$ Mg/m³) بنابراین باندهـای انرژی درقلع سفید همپوشانی دارند و این فـاز رسانـای فلزی است (به‌شکل ۵-۲-۲ (ب) رجوع کنید).




**شکل ۵-۴-۳** ساختار بلوری نیمرساناهای متداول. الف) الماس، سیلیسیم، ژرمانیم، و قلع خاکستری؛ ب) ZnS ، GaP ، Ga As ، InP ، و ... (به‌شکل ۸-۲-۳ رجوع کنید). تنها اختلاف دوساختار دراین است که در ترکیبات نیمرسانا، دونوع اتم وجود داردکه نقاط شبکه را متناوباً پر کرده‌اند. عدد کوئوردیناسیون برای تمام اتمها ۴ است. به‌طور متوسط هر اتم چهار الکترون ظرفیتی و هر پیوند دو الکترون دارد.

علاوه برچهار عنصر گروه IV که نیمرسانندگی را از ساختاری نظیر شکل ۵-۴-۳ (الف) به دست آورده‌اند، تعدادی از ترکیبات گروههای III-V نیز دارای چنین ساختاری‌اند [شکل ۵-۴-۳ (ب) ]. اتمهای عناصر گروه III جدول تناوبی (In ، Ga ، B ،Al) به‌طور متناوب با اتمهای عناصر گروه V (N ، P ، As ، Sb) درساختار بلوری




**شکل ۵-۴-۴** نیمرسانا ذاتی (ژرمانیم). الف) نمایش‌طرحوار الکترونها درپیوند اشتراکی (و ظرفیتی آنها) ؛ ب) جفت الکترون - حفره (الکترود مثبت، سمت چپ فرض شده است) ؛ ج) شکاف انرژی‌که الکترون پس‌از گذشتن از آن به‌باند رسانش می‌رسد. درمقابل هر الکترون رسانش، یك‌حفره در الکترونهای ظرفیتی ایجاد شده است.

قرار می‌گیرند. اکثر این ۱۶ ترکیب III–V که می‌توانند از این عناصر تشکیل شوند نیمرسانایند زیرا هر اتم چهار همسایه دارد و به‌طورمتوسط چهار الکترون ظرفیتی به‌اشتراك گذاشته است، و دراین‌صورت حالتی نظیر آنچه درسیلیسیم و ژرمانیم، نیمرساناهای اصلی، وجود دارد ایجاد خواهد شد.

**تحرك بار.** حال باید رابطهٔ اولیه درمورد رسانندگی (رابطهٔ ۱–۴–۱) را مطابق با شکل ۲–۵–۱ شرح داد، زیرا نیمرسانای ذاتی هردوحامل مثبت و منفی را دارد.

الکترونهایی که به‌باند رسانش می‌جهند، حاملهای نوع منفی‌اند. رسانندگی ایجاد شده توسط این الکترونها، به‌تحرك $\mu_n$ آنها از میان باند رسانش نیمرسانا بستگی دارد. حفره‌های الکترونی تشکیل شده در باند ظرفیتی حاملهای نوع مثبت‌اند.* رسانندگیی که ایجاد می‌کنند به‌تحرك $\mu_p$ آنها ازمیان باند ظرفیتی نیمرسانا بستگی دارد. رسانندگی کل از اتحاد هردوحاصل می‌شود.

$$\sigma = n_n q \mu_n + n_p q \mu_p \qquad (۱–۴–۵)$$

البته، هم الکترون و هم حفرهٔ الکترونی همان بار واحد اصلی $۰٫۱۶ \times ۱۰^{-۱۸}$ کولن را حمل می‌کنند. در نیمرسانای ذاتی به‌ازای هر الکترون رسانشی یك حفرهٔ الکترونی ایجاد می‌شود و $n_n = n_p$ است بنابراین می‌توان رابطهٔ (۵–۴–۱) را ساده‌کرد. ولی در نیمرساناهای خارجی این دومقدار مساوی نیستند، بنابراین بهتراست شکل کلی این رابطه به‌همان صورت باقی بماند.

جدول ۵–۴–۲ مشخصات تعدادی از نیمرساناها را نشان می‌دهد و در این زمینه دونکتهٔ مهم را می‌توان عمومیت داد:

۱. اندازهٔ شکاف انرژی برای عناصر جدول تناوبی از بالا به پایین کم می‌شود، (C→Si→Ge→Sn) یا (GaP→GaAs→GaSb) یا (AlSb→GaSb→InSb)

۲. تحرك الکترونها درنیمرسانا ازتحرك حفره‌های الکترونی درهمان‌نیمرسانا بیشتر است.** این موضوع درکاربرد نیمرساناهای نوع $n$ درمقایسه بانوع $p$ بسیار مهم است.

**نیمرسانای (ذاتی) برحسب دما.** برخلاف فلزات که در دماهای بالا افزایش مقاومت ویژه (وکاهش‌رسانندگی) نشان‌می‌دهند (شکل ۵–۲–۱)، درنیمرساناهای‌ذاتی با زیادشدن دما رسانندگی افزایش می‌یابد. توضیح آنکه تعداد حاملهای بار، $n$، مستقیماً با تعداد

---

* درمقایسه باآن، آنیونها که الکترونهای اضافی دارند از نوع منفی‌اند، و کاتیونها که کمبود الکترون دارند ازنوع مثبت‌اند.

** این رابطه برای تمام نیمرساناهای جدول ۵–۴–۲ وجود دارد، به استثنای AlSb که درآن داده‌های مربوط به‌تحرك دقیقاً مشخص نشده‌اند.

**جدول ۵-۴-۲** خواص نیمرساناهای معمولی (۲۰°C)

| ماده | شکاف انرژی، $E_g$ $10^{-18}$J | شکاف انرژی، $E_g$ eV | تحرک، $m^2$/volt·sec الکترون، $\mu_n$ | تحرک، $m^2$/volt·sec حفره، $\mu_p$ | رسانندگی ذاتی، $\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$ | ثابت شبکه، $a$، nm |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| عناصر | | | | | | |
| C (الماس) | ۰٫۹۶ | ~۶ | ۰٫۱۷ | ۰٫۱۲ | $<10^{-16}$ | ۰٫۳۵۷ |
| سیلیسیم | ۰٫۱۷۶ | ۱٫۱ | ۰٫۱۹ | ۰٫۰۴۲۵ | $5\times10^{-4}$ | ۰٫۵۴۳ |
| ژرمانیم | ۰٫۱۱۲ | ۰٫۷ | ۰٫۳۶ | ۰٫۲۳ | ۲ | ۰٫۵۶۶ |
| قلع(خاکستری) | ۰٫۰۱۶ | ۰٫۱ | ۰٫۲۰ | ۰٫۱۰ | $10^{6}$ | ۰٫۶۴۹ |
| ترکیبات | | | | | | |
| AlSb | ۰٫۲۶ | ۱٫۶ | ۰٫۰۲ | — | — | ۰٫۶۱۳ |
| GaP | ۰٫۳۸ | ۲٫۳ | ۰٫۰۱۹ | ۰٫۰۱۲ | — | ۰٫۵۴۵ |
| GaAs | ۰٫۲۲ | ۱٫۴ | ۰٫۸۸ | ۰٫۰۴ | $10^{-6}$ | ۰٫۵۶۵ |
| GaSb | ۰٫۱۱ | ۰٫۷ | ۰٫۶۰ | ۰٫۰۸ | — | ۰٫۶۱۲ |
| InP | ۰٫۲۱ | ۱٫۳ | ۰٫۴۷ | ۰٫۰۱۵ | ۵۰۰ | ۰٫۵۸۷ |
| InAs | ۰٫۰۵۸ | ۰٫۳۶ | ۲٫۲۶ | ۰٫۰۲۶ | $10^{4}$ | ۰٫۶۰۴ |
| InSb | ۰٫۰۲۹ | ۰٫۱۸ | ۸٫۲ | ۰٫۱۷ | — | ۰٫۶۴۸ |
| ZnS | ۰٫۵۹ | ۳٫۷ | ۰٫۰۱۴ | ۰٫۰۰۰۵ | — | — |
| SiC (شش‌بر) | ۰٫۴۸ | ۳ | ۰٫۰۱ | ۰٫۰۰۲ | — | — |

الکترونهایی‌که از شکاف انرژی می‌گذرند زیاد می‌شود (شکل ۵-۴-۱). در دمای صفر مطلق هیچ الکترونی‌انرژی لازم برای این‌کارندارد، ولی با بالارفتن دماالکترونها درست مانند اتمها انرژی‌کسب می‌کنند. در ۲۰°C تعداد قابل توجهی از الکترونهای ظرفیتی سیلیسیم، ژرمانیم و قلع بیش از شکاف انرژی، $E_g$، انرژی دارند (جدول ۵-۴-۱) این موضوع برای نیمرسانای ترکیبی نیز صادق است.

ازآنجا که توزیع انرژی‌گرمایی الکترونها شبیه توزیع انرژی‌گرمایی اتمها در رابطهٔ (۴-۶-۲) است می‌توان نوشت

$$n_{\text{i}} \propto e^{-(E-\bar{E})/kT} \qquad \text{(۵-۴-۲، الف)*}$$

دراین‌رابطه $n_{\text{i}}$ تعداد الکترونهای باند رسانش درهرمترمکعب (وتعداد حفره‌های باندظرفیتی درهرمترمکعب) است. درشکاف انرژی ممنوع نیمرساناهای ذاتی انرژی متوسط $\bar{E}$ در نیمهٔ شکاف است، $E_{\text{g}}/۲$. بنابراین

$$n_{\text{i}} \propto e^{-E_{\text{g}}/2kT} \qquad \text{(۵-۴-۲، ب)}$$

مانند فصل ۴، $T$ دمای مطلق (K)، و $k$ ثابت بولتسمان است و معمولا به‌جای $۱٫۳۸ \times ۱۰^{-۲۴}$ J/K به‌صورت $۸٫۶ \times ۱۰^{-۶}$ eV/K نوشته می‌شود.

رسانندگی $\sigma$ مستقیماً به‌تعداد حاملهای $n$ بستگی دارد؛ بنابراین

$$\sigma = \sigma_{\circ} e^{-E_{\text{g}}/2kT} \qquad \text{(۵-۴-۳، الف)}$$

که درآن $\sigma_{\circ}$ ثابت تناسب است که بین عوامل دیگر شامل $q$ و $\mu$ از رابطهٔ (۵-۱-۱)، می‌شود و همچنین، تحرک $\mu$ با دما مقداری تغییر می‌کند؛ ولی تغییرات آن در گسترهٔ معمولی بیشتر نیمرساناها، درمقایسه با تغییرات تعداد حاملهای $n$ که به‌صورت تابع نمایی است، کوچك است. درنتیجه این رابطه را می‌توان به‌صورت رابطهٔ آرنیوس نوشت

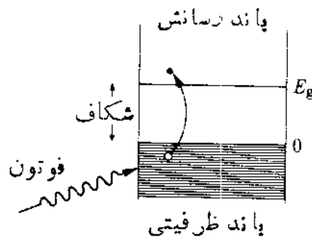
$$\ln \sigma = \ln \sigma_{\circ} - \frac{E_{\text{g}}}{2kT} \qquad \text{(۵-۴-۳، ب)}$$

اگر رسانندگی (یا مقاومت ویژه) را درآزمایشگاه درچند دمای مختلف تعیین‌کنیم و $\ln \sigma$ را برحسب $۱/T$ بکشیم شیب منحنی مقدار شکاف انرژی ($E_{\text{g}}$) را مشخص خواهدکرد، یعنی شیب برابراست با $E_{\text{g}}/۲k$ — وبااستفاده از $E_{\text{g}}$ و یکی از مقادیرمعلوم $\sigma$، می‌توان $\sigma$ را در دمای دیگری نیز محاسبه‌کرد (مثال ۵-۴-۴).

**رسانش نوری.** درشرایط عادی احتمال بسیارکمی‌وجود داردکه الکترون ظرفیتی‌سیلیسیم ازشکاف انرژی گذشته به‌باند رسانش برسد (مطابق جدول ۵-۴-۱ این احتمال تقریباً ۱ به $۱۰^{۱۳}$ است). برعکس یك‌فوتون نورقرمز (طول‌موج = ۶۶۰ nm)، ۱٫۹ eV انرژی داردکه از انرژی‌لازم برای پریدن الکترون ازشکاف انرژی ۱٫۱ الکترون ولتی‌سیلیسیم بیشتر است (شکل ۵-۴-۵). بنابراین سیلیسیم هنگامی‌که در معرض نور قرار می‌گیرد، رسانندگی‌آن در اثرفعالسازی نوری تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

---

* رابطه‌های (۵-۴-۲، الف) و (۵-۶-۳، الف) فقط درانتهایی بالایی‌گسترهٔ انرژی مشابه‌اند. درآن‌گستره، اصل‌پائولی درمورد دوالکترون‌درهرحالت کوانتومی‌محدودکننده‌نیست، زیرا احتمال اشغال آنها بسیارکم است. البته توجه‌ما به‌انتهای بالایی‌گستره و به‌الکترونهای اولیه‌ای که ازشکاف عبور می‌کنند معطوف است.




**شکل ۵-۴-۵** رسانش نوری. با برخورد یک‌فوتون (یعنی انرژی نوری) به‌الکترون، انرژی‌لازم جهت انتقال الکترون به‌باند رسانش در آن ایجاد می‌شود و جفت «الکترون رسانش+حفرهٔ ظرفیتی» ایجاد و حامل بار تولید می‌شود. هنگام بازگشت الکترون به باند ظرفیتی، باز ترکیب [رابطهٔ ۵-۴-۴ (ب)] صورت می‌گیرد.

**باز ترکیب.** مطابق با شکل ۵-۴-۵ واکنشی را که سبب ایجاد یک‌جفت الکترون - حفره می‌شود به‌صورت زیر می‌توان نوشت



$$E \rightarrow n + p \qquad \text{(۵-۴-۴، الف)}$$

که در آن $E$ انرژی، $n$ الکترون رسانش، و $p$ حفرهٔ پدیدآمده درباند ظرفیتی است. در این‌حالت انرژی از نور به‌دست می‌آید، ولی می‌تواند از منبع انرژی دیگری مثل گرما یا الکترونهایی با حرکت سریع نیز به‌دست آید.

از آنجا که تمام مواد هنگامی‌که انرژی خود را کم می‌کنند پایدارترند، جفت الکترون - حفره دیر یا زود بازترکیب خواهد شد



$$n + q \rightarrow E \qquad \text{(۵-۴-۴، ب)}$$

دراین حالت الکترون مجدداً از باند رسانش به‌باند ظرفیتی برمی‌گردد و درست مطابق با عکس شکل ۵-۴-۴ (ج) عمل می‌کند. اگر نور یا منبع انرژی دیگری برای تولید مداوم جفتهای الکترون - حفره وجود نداشته باشد، باند رسانش به تدریج خالی خواهد شد.

برای بازترکیب شدن، درمواد مختلف زمان متفاوت است، با این‌حال یک قاعدهٔ خاص رعایت می‌شود، زیرا دریک مادهٔ معین برای هرالکترون رسانش احتمال بازترکیب شدن دراین لحظه و درثانیه‌ها (یا دقیقه‌ها)ی بعد یکسان است و رابطهٔ زیر را می‌توان ذکر کرد

$$N = N_{\circ} e^{-t/\tau} \qquad \text{(۵-۴-۵، الف)}$$

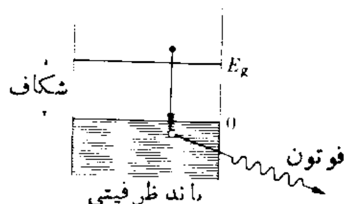
که معمولا به‌صورتی که درصفحهٔ بعدآمده است تغییرشکل می‌یابد

$$\ln(N_\circ/N)=t/\tau \qquad (۵-۴-۵؛ ب)^*$$

در این رابطه‌ها $N_\circ$ تعداد الکترونهای موجود در باند رسانش در زمان معین (مثلاً هنگام خاموش‌شدن منبع نورانی) و $N$ تعداد الکترونهای رسانش باقی مانده پس از زمان $t$ است. $\tau$ زمان باز ترکیب یا افت نامیده می‌شود و از ویژگیهای ماده است.

□ **لیانی.** انرژی آزاد شده در رابطهٔ (۵-۴-۴، ب)، ممکن است به‌صورت گرما یا نور ظاهر شود. اگر به‌صورت نور ظاهرشود از لیانی صحبت به‌میان می‌آید (شکل ۵-۴-۶). گاهی لیانی به‌چند نوع تقسیم می‌شود، لیانی نوری پدیده‌ای است که در آن الکترون به‌وسیلهٔ فوتون‌نور تحریك‌می‌شود و به‌باند رسانش‌صعود‌می‌کند، در لیانی شیمیایی تحریك اولیه ناشی از واکنشهای شیمیایی است، لیانی الکتریکی احتمالاً معروفترین نوع است زیرا پدیده‌ای‌است که درلامپ تلویزیون انجام می‌گیرد. در داخل لامپ تلویزیون جریانی از الکترونها (اشعهٔ کاتدی) که صفحهٔ تصویر را جارومی کنند موجب‌می‌شوندکه‌الکترونهای فسفر به‌باند رسانش‌انتقال یابند. تقریباً بلافاصله الکترونها و حفره‌ها باز ترکیب می‌شوند و انرژی به‌صورت نور مرئی صادر می‌شود.

از آنجا که‌سرعت باز ترکیب با تعداد الکترونهای تحریك‌شده‌متناسب است، شدت لیانی، $I$، از رابطه‌ای نظیر (۵-۴-۵، ب) پیروی می‌کند




**شکل ۵-۴-۶** لیانی. هر یك‌هزارم ثانیه جزئی از الکترونهای تحریك شده که به‌باند رسانش رفته‌اند به‌باند ظرفیتی باز می‌گردند و همین‌که از شکاف انرژی می‌گذرند انرژی به‌صورت فوتون نور آزاد می‌شود.

---

* رابطهٔ (۵-۴-۵) را می‌توان از راه محاسبه از اطلاعات فوق به‌دست‌آورد

$$dN/dt=-N/\tau \qquad (۵-۴-۶)$$

با جابه‌جا کردن وسطین داریم $\quad dN/N=-dt/\tau$

پس از انتگرال‌گیری رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید

$$\ln N/N_\circ=-t/\tau \qquad (۵-۴-۵،ج)$$

$$\ln(I_0/I)=t/\tau \qquad (۵-۴-۷)$$

در لامپ تلویزیون فسفر به‌عنوان مادهٔ لیانی انتخاب می‌شود و زمان افت آن چنان است که نور به‌طور مداوم تولید می‌شود. یعنی بین دو جارو کردن صفحهٔ تصویر گسیل‌شدن نور ادامه می‌یابد. در نتیجه چشم بیننده تاریکی و روشنایی متناوب را تشخیص نمی‌دهد. با این حال شدت نور از واکنش قبلی باید به‌اندازهٔ کافی ضعیفتر شده باشد تا نور جدید که حدود ۱/۳۰ ثانیه بعد می‌آید قابل تشخیص باشد. (به‌مثال ۵-۴-۵ مراجعه کنید.)

**مثال ۵-۴-۱** الف) چه کسری از بار درسیلیسیم که‌نیمرسانای ذاتی است توسط الکترونها حمل می‌شود؟ ب) چه کسری توسط حفره‌های الکترونی حمل می‌شود؟

حل: از رابطهٔ (۵-۴-۱) و جدول ۵-۴-۲، و با داشتن $n_n=n_p$ در نیمرسانای ذاتی داریم

$$\frac{\sigma_n}{\sigma}=\frac{\mu_n}{\mu_n+\mu_p}$$

$$=\frac{۰٫۱۹\,\mathrm{m^2/V\cdot s}}{۰٫۲۳۲۵\,\mathrm{m^2/V\cdot s}}=۰٫۸۲$$

$$\frac{\sigma_p}{\sigma}=۰٫۱۸$$

توضیح. به‌طور کلی رسانندگی در باند رسانش بیشتر است از رسانندگی ناشی از حفره‌های الکترونی در باند ظرفیتی. ▲

**مثال ۵-۴-۲** ازجدول ۵-۴-۲، ترکیب گالیم-آرسناید در $۲۰^\circ\mathrm{C}$ دارای رسانندگی‌ذاتی $۱۰^{-۶}\Omega^{-1}\cdot\mathrm{m}^{-1}$ است. چه تعداد الکترون از شکاف انرژی عبور کرده‌اند؟

حل: از رابطهٔ (۵-۴-۱) داریم

$$n=\frac{(۱۰^{-۶}\Omega^{-1}\cdot\mathrm{m}^{-1})}{(۰٫۱۶\times۱۰^{-۱۸}\mathrm{amp\cdot sec})(۰٫۸۸+۰٫۰۴\,\mathrm{m^2/V\cdot sec})}$$

$$=\frac{۶٫۸\times۱۰^{۱۲}}{\mathrm{m^3}}$$

توضیح. درهرمترمکعب $۱٫۳۶\times۱۰^{۱۳}$ حامل‌وجود خواهدداشت. زیرا هر الکترونی که تحریک شده از شکاف انرژی می‌گذرد یک‌حفرهٔ الکترونی باقی می‌گذارد. ▲

**مثال ۵-۴-۳** قلع خاکستری چهاراتم‌ظرفیتی دارد و اندازهٔ سلول واحد آن ۰٫۶۴۹nm است [شکل ۵-۴-۳ (الف)]. محاسبات متعدد نشان می‌دهند که درهر سانتی‌مترمکعب $۲ \times ۱۰^{۲۵}$ الکترون رسانش وجود دارد. چه کسری از الکترونها به‌باند رسانش رفته‌اند؟

حل: براساس محاسبات انجام شده از روی شکل ۵-۴-۳، در هرسلول واحدهشت اتم قلع وجود دارد.

= الکترونهای ظرفیتی دریك سانتی‌متر مکعب

$$\frac{(\text{۴ الکترون در هراتم}) \times (\text{۸ اتم درهر سلول واحد})}{(۰٫۶۴۹ \times ۱۰^{-۹}\mathrm{m})^۳/\text{سلول واحد}} = \frac{۱٫۱۷ \times ۱۰^{۲۹}}{\mathrm{m}^۳}$$

$$\text{کسر الکترونهای فعال شده} = \frac{۲ \times ۱۰^{۲۵}}{۱٫۱۷ \times ۱۰^{۲۹}} \cong ۰٫۰۰۰۲$$ ▲

**مثال ۵-۴-۴** مقاومت ویژهٔ ژرمانیم در ۲۰ °C (۶۸ °F) برابر با ۰٫۵ Ω . m است. در ۴۰°C (۱۰۴°F) مقاومت ویژهٔ آن‌چقدر است؟

حل: با استفاده‌از رابطهٔ (۵-۴-۳) و اندازهٔ‌شکاف‌انرژی ۰٫۷ eV (جدول ۵-۴-۲)

$$\frac{\sigma_۲}{\sigma_۱} = \frac{\rho_۱}{\rho_۲} = \frac{\sigma_۰ e^{-Eg/۲kT_۲}}{\sigma_۰ e^{-Eg/۲kT_۱}}$$

$$\ln\frac{\rho_۱}{\rho_۲} = \left(\frac{E_g}{۲k}\right)\left[\frac{۱}{T_۱} - \frac{۱}{T_۲}\right] \qquad (۵-۴-۸)$$

$$= \frac{۰٫۷\ \mathrm{eV}}{۲(۸۶٫۱ \times ۱۰^{-۶}\mathrm{eV/K})}\left[\frac{۱}{۲۹۳\,\mathrm{K}} - \frac{۱}{۳۱۳\,\mathrm{K}}\right] = ۰٫۹$$

$$\frac{\rho_۱}{\rho_۲} = \sim ۲٫۵$$

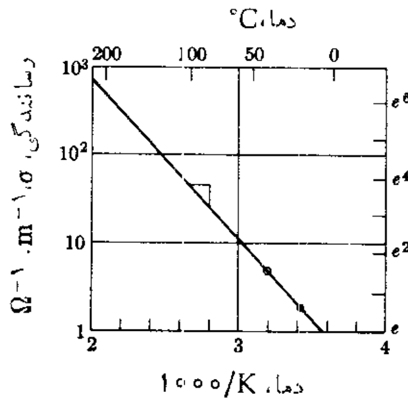
پس‌اگر $\rho_{۲۰°C} = ۰٫۵\ \Omega . \mathrm{m}$، $\rho_{۴۰°C} = ۰٫۲\ \Omega . \mathrm{m}$

راه‌حل دیگر: با استفاده از شیب (شکل ۵-۴-۷)

$$\text{شیب} = -\frac{۰٫۷\ \mathrm{eV}}{۲(۸۶٫۱ \times ۱۰^{-۶}\mathrm{eV/K})} = -۴۰۶۰\,\mathrm{K}$$

یا

$$\text{شیب} = -\frac{۰٫۱۱۲ \times ۱۰^{-۱۸}\mathrm{J}}{۲(۱۳٫۸ \times ۱۰^{-۲۴}\mathrm{J/K})} = -۴۰۶۰\,\mathrm{K}$$




**شکل ۵-۴-۷** نیمرسانش برحسب دما (ژرمانیم بـا رسانندگی ذاتی). شیب منحنی بـرابر $-E_g/2k$ در رابطهٔ ۵-۴-۳ است. صورت $\ln\sigma$ و مخرج عکس دما $K^{-1}$ است. (مثال ۵-۴-۴ را ببینید)

یا

در $20°C(\bullet)$

$$\ln\sigma = \ln(1/0.5\ \Omega\cdot m) = 0.693 \quad (\text{یا } \log_{10} = 0.301)$$

$$1/T = 1/293K = 0.00341/K \quad (\text{یا } 1000/T = 3.41)$$

در $40°C(\circ)$

$$1/T = 1/313K = 0.00319/K \qquad (\text{یا } 1000/T = 3.19)$$

$$-4060\ K = \frac{0.693 - \ln\sigma_{40°C}}{(0.00341 - 0.00319)/K}$$

$$\ln\sigma_{40°C} = 1.6 \quad (\text{یا } \log\sigma_{40°C} = 0.7)$$

$$\sigma_{40°C} = 5\ \Omega^{-1}m^{-1}\ (\text{یا } \rho = 0.2\ \Omega\cdot m)$$

توضیح. تغییر مقاومت (و بنا براین تغییرمقاومت ویژه) ۱ر۰% > قابل اندازه‌گیری است. پس مـی‌توان بدین‌وسیله تغییرات خیلی جزئی دمـا را نیز اندازه‌گیری کرد (مسئلهٔ ۵-۶-۱). ▲

☐ **مثال ۵-۴-۵** اشعهٔ الکترونی صفحهٔ تلویزیون درهر ثانیه ۳۰ بار صفحه را جاروب می‌کند. اگر ماده روی صفحهٔ تصویر، فسفر باشد و هنگام دیدن پرتو بعدی تنها ۲۰% از پرتو قبلی باقی بماند، زمان افت الکترونهای فعال شدهٔ فسفر را بیابید.

حل: با استفاده از رابطهٔ (۵-۴-۷)

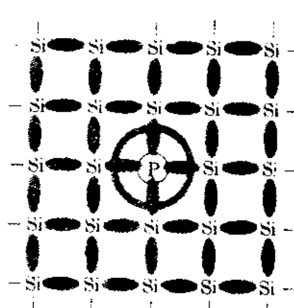
$$\ln\left(\frac{۱٫۰۰}{۰٫۲۰}\right) = \frac{۰٫۰۳۳\ \text{sec}}{\tau}$$

$$\tau = ۰٫۰۲\ \text{sec}$$

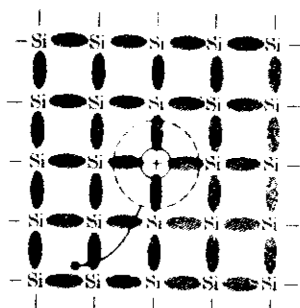
توضیح. واژهٔ فلوئورسانی وقتی به‌کارمی‌رود که زمان افت نسبت به‌کل زمان دیدن اندك باشد، اگر لیانی پس- تاب داشته باشد واژهٔ فسفرسانی را به‌کار می‌بریم. ▲

## ۵-۵ نیمرساناهای خارجی

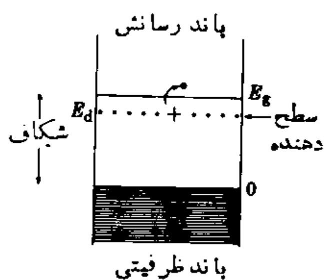
**نیمرسانای نوع $N$.** ناخالصیها باایجادالکترون‌اضافی یاحفرهٔ اضافی‌می‌توانند برخاصیت نیمرسانایی‌مواد اثر بگذارند. مثلا سیلیسیمی را که‌شامل یك‌اتم فسفر است درنظر بگیرید. سیلیسیم چهارالکترون ظرفیتی دارد، حال آنکه فسفر دارای پنج‌الکترون ظرفیتی است. در شکل ۵-۵-۱ (الف) این الکترون، مستقل ازجفت الکترونهایی که بین اتمهای مجاور پیوند برقرار کرده‌اند دیده می‌شود. این الکترون می‌تواند بارالکتریکی را به‌طرف



(الف)



(ب)

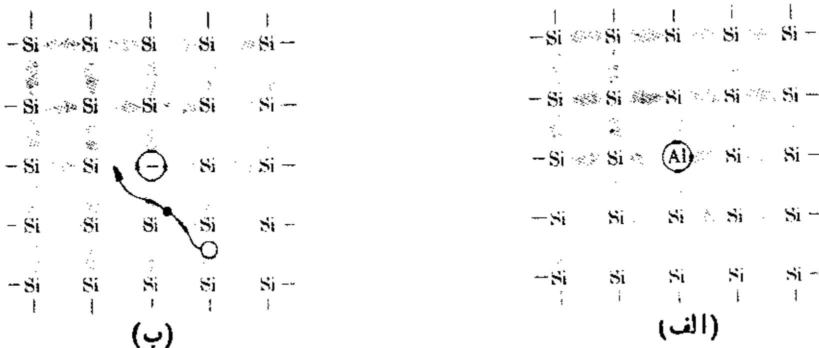


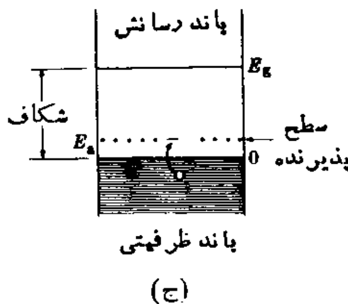
(ج)

**شکل ۵-۵-۱** نیمرسانای خارجی (نوع $n$). اتمهای گروه V ازعناصری که در شکل ۵-۴-۳ دیده می‌شوند و به‌طور متوسط دارای ۴الکترون ظرفیتی‌اند، دارند. درمیدان الکتریکی، این الکترون بااندکی انرژی از اتم مادر جدا می‌شود و به باندرسانش «ارسال» می‌شود تاحامل بارالکتریکی‌شود. به‌این‌ترتیب انرژی ترازدهنده، $E_d$، قبل‌از بالاترین نقطهٔ شکاف انرژی واقع‌است. الف) ناخالصی نوع $n$، مثل فسفر؛ ب) اتم یونیدهٔ فسفر (الکترود مثبت در سمت‌چپ قرار گرفته است)؛ ج) مدل باند.

الکترود مثبت حمل کند [شکل ۵-۵-۱ (ب)]. درحالت دیگر در شکل ۵-۵-۱ (ج)، الکترون اضافی که نمی‌تواند در باند ظرفیتی که قبلا پرشده قرار گیرد، در قسمت بالای شکاف انرژی خواهد ماند. از این موقعیت که ترازدهنده، $E_d$، نام دارد خواهد توانست به‌راحتی فعال شده به باند رسانش صعود کند. بنابراین مشاهده می‌شود که بدون درنظر گرفتن اینکه چه مدلی به کار رفته، شکل ۵-۵-۱ (ب) یا ۵-۵-۱ (ج)، عناصر گروه V جدول تناوبی (شکل ۲-۱-۱)، (Sb، As، P، N) می‌توانند حامل بارمنفی (یا نوع $n$) را در نیمرساناها پدید آورند.

**نیمرساناهای نوع $P$.** عناصر گروه III (In، Ga، Al،B) تنها سه‌الکترون‌ظرفیتی‌دارند و هنگامی‌که به‌صورت ناخالصی به‌سیلیسیم افزوده شوند حفرهٔ الکترونی به‌وجود خواهند آورد. همچنان‌که درشکل ۵-۵-۲ (الف) و (ب) دیده می‌شود هراتم آلومینیم می‌تواند یك‌الکترون بپذیرد ودر واقع مثل آن است که یك‌بار مثبت به‌طرف الکترود منفی حرکت کرده باشد. با استفاده از مدل باند [شکل ۵-۵-۲ (ج)] مشاهده می‌شود که اختلاف انرژی برای حرکت الکترونها از باند ظرفیتی به ترازپذیرنده، $E_a$، به‌مراتب کمتراز کل شکاف انرژی است. بنابراین الکترونها در مکانهای پذیرنده ساده‌تر از باند رسانش فعال




**شکل ۵-۵-۲** نیمرسانای خارجی (نوع $p$). اتمهای گروه III یك الکترون ظرفیتی کمتر ازچهار الکترون ظرفیتی سیلیسیم که در شکل ۵-۴-۳ دیده می‌شود، دارند. چنین اتمی می‌تواند یك الکترون از باند ظرفیتی بپذیرد و بدین‌ترتیب یك حفرهٔ الکترونی به‌عنوان حامل بارالکتریکی به جا گذارد. انرژی ترازپذیرنده، $E_a$، اندکی بالاتر از پایینترین نقطهٔ شکاف انرژی است. الف) ناخالصی نوع $p$، مثل آلومینیم؛ب) اتم یونیدهٔ آلومینیم (الکترودمنفی در سمت راست قرارگرفته است)؛ج) مدل باند.

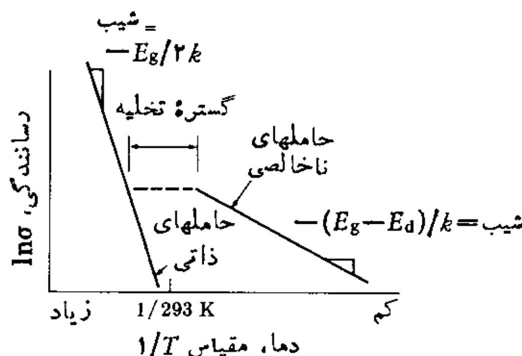
می‌شوند. حفره‌های الکترونی که در باند ظرفیتی باقی می‌مانند برای *نیمرساناهای نوع* $p$ حامل بار مثبت به‌شمار می‌آیند.

**تخلیهٔ‌دهنده‌ها (و اشباع‌پذیرنده‌ها).** از آنجا که الکترونها برای انتقال به‌باند رسانش فقط پرش اندکی می‌کنند، در دماهای کم‌رسانش خارجی آنها آغاز می‌شود. با افزایش دما شیب منحنی آرنیوس، مطابق با سمت‌راست شکل ۵-۵-۳، برابر $-(E_g - E_d)/k$ — خواهد بود.

اگر تعداد ناخالصیهای دهنده محدود باشد (مثلا در سیلیسیم $10^{21}\mathrm{P/m^3}$)، اساساً تمام الکترونهای داده‌شده در زیر دمای معمولی کاربرد آنها، به‌باند رسانش منتقل می‌شوند. دراین صورت تخلیه صورت گرفته‌است. در مثال فوق در مورد عدد $10^{21}/\mathrm{m^3}$ رسانندگی خارجی برابراست با

$$\sigma_{ex} = (10^{21}/\mathrm{m^3})(0.16 \times 10^{-18}\,\mathrm{A \cdot sec})(0.19\,\mathrm{m^2/V \cdot sec})$$
$$= 30\,\Omega^{-1} \cdot \mathrm{m}^{-1}$$

رسانندگی خارجی با افزایش بیشتر دما، افزایش بیشتری نمی‌یابد و ناحیه‌ای با رسانندگی ثابت وجود دارد.*



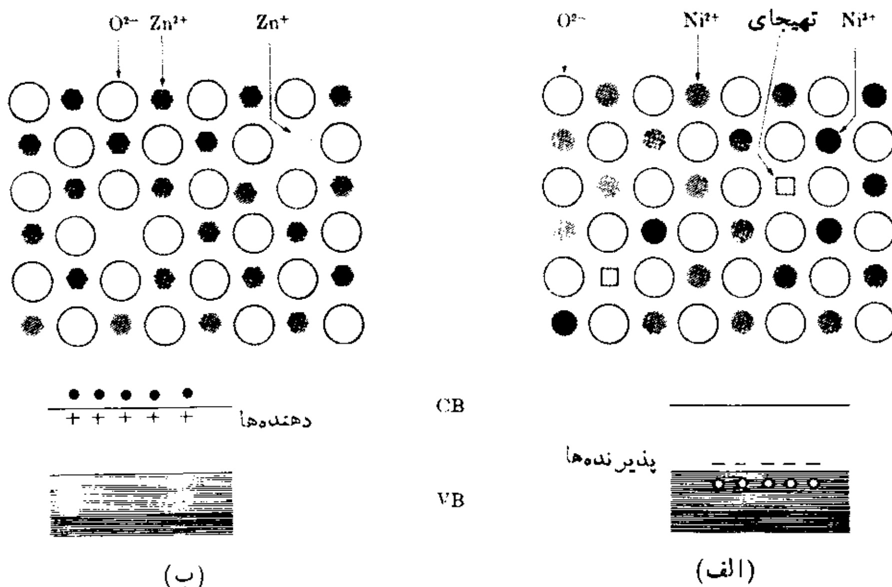

**شکل ۵-۵-۳** تخلیه دهنده‌ها. در رسانندگی ذاتی (منحنی سمت چپ) انرژی «$E_g$» ودر رسانندگی خارجی (منحنی سمت‌راست) انرژی «$E_g - E_d$» لازم است تا الکترونها به‌باند رسانش منتقل شوند. در دماهای پایین الکترونهای دهنده موجب رسانندگی می‌شوند. تخلیه هنگامی اتفاق می‌افتد که تمام الکترونهای دهنده به‌باند رسانش رفته باشند و در عین‌حال دما هنوز آنقدر زیاد نشده‌باشد که انرژی گرمایی بتواند الکترونهای ظرفیتی را ازشکاف انرژی عبور دهد. دراین گسترهٔ دما رسانندگی تقریباً ثابت است.

* با $n$ ثابت، آزمایشها کاهش اندکی در $\mu$ نشان می‌دهند که منشأ آن میانگین مسیر آزاد کوتاهتری است که از افزایش دما به‌وجود می‌آید (بخش ۵-۲).

ضمناً رسانندگی ذاتی در نیمرساناهایی مثل سیلیسیم بسیار کم است (طبق جدول ۵–۴–۱ در $20°C$ برابر $5 \times 10^{-4} \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ است). منحنی آرنیوس مربوط به‌آن در سمت‌چپ شکل ۵–۵–۳ با شیب‌ذاتی $-E_g/2k$ — یعنی $-1/1\ eV/2k = 6400K$ دیده می‌شود. فقط در دماهای بالاتر کل رسانندگی ازحد تخلیه بیشتر خواهد شد (به‌مثال ۵–۵–۳ رجوع کنید).

تخلیهٔ دهنده‌های نیمرساناهای نوع $n$ نیز مانند اشباع‌پذیرنده‌ها از نیمرساناهای نوع $p$ است. (پاراگراف قبل‌را برای مبحث اشباع نیز تکرار کنید.) تخلیهٔ دهنده‌ها و اشباع‌پذیرنده‌ها برای مهندسان مواد و برق اهمیت بسیار دارد زیرا این‌حالت موجب به‌وجود آمدن ناحیه‌ای شده است که درآن رسانندگی ثابت است. یعنی لازم نیست که تغییرات دما را در مدارهای الکتریکی درنظر گیرند. در صورتی‌که اگر $\log \sigma$ با $1/T$ به‌صورت خطی صعودی‌تغییر می‌کرد دما باید درنظر گرفته می‌شد.

□ **نیمرساناهای معیوب.** اکسیدآهن شکل۴–۳–۲ علاوه بریون‌عادی $Fe^{2+}$، یون $Fe^{3+}$ نیز دارد. وضعیت مشابهی در اکسید شدن $NiO$ و ایجاد یون $Ni^{3+}$ به‌وجود می‌آید که درشکل ۵–۵–۴ (الف) دیده می‌شود، و این معمولا در اکسید فلزات واسطه‌که ظرفیتهای




**شکل ۵–۵–۴** نیمرساناهای معیوب. الف) $Ni_{1-x}O$ یونهای $Ni^{3+}$ به عنوان پذیرندهٔ الکترون عمل می‌کنند به‌طوری‌که در باند ظرفیت حفرهٔ الکترونی، ○، ایجاد می‌شود؛ ب) $Zn_{1+y}O$. یونهای $Zn^{+}$ دهندهٔ الکترون، ●، به باند رسانش‌هستند به‌طوری‌که نیمرسانای‌نوع $n$ را به‌وجود می‌آورند.

متعددی دارند اتفاق می‌افتد. در اکسید نیکل سه‌یون $Ni^{2+}$ جانشین دو یون $Ni^{3+}$ و یك تهیجای، □ ، می‌شوند. به‌این ترتیب موازنهٔ بار الکتریکی برقرار می‌شود؛ همچنین نفوذ آسانتر شده قدری رسانندگی یونی به‌وجود می‌آید. مهمتر آنکه الکترونها می‌توانند ازیك یون $Ni^{2+}$ به‌ترازهای پذیرش یون $Ni^{3+}$ انتقال یابند. به‌عکس، حفرهٔ الکترونی هنگامی که به‌طرف الکترود منفی درحرکت است از یك‌یون نیکل به‌یون دیگر می‌رود. اکسید نیکل و سایر اکسیدهایی که بافرمول $M_{1-x}O$ نشان داده می‌شوند و ساختاری معیوب‌دارند را می‌توان نیمرسانای نوع $p$ به‌شمار آورد.

اکسیدهای نوع $n$ نیز وجود دارند. اکسید روی‌وقتی درمحیط احیاکننده قرارگیرد تعدادی از اکسیژنهایش را ازدست داده $Zn_{1+y}O$ تولید می‌کند. البته دراین صورت تهیجای اکسیژن به‌وجود نمی‌آید بلکه یك یون روی به‌محل جانشینی می‌رود [شکل ۵-۵-۴ (ب)]. یونهای $Zn^{+}$ که برای موازنهٔ بار الکتریکی وارد می‌شوند از حالت عادی یونهای $Zn^{2+}$ یك‌الکترون بیشتر، بنابراین الکترونهایی به‌باند رسانش می‌دهند تا نیمرسانندگی نوع $n$ ایجاد شود.

**مثال ۵-۵-۱** رسانندگی سیلیسیم خالص طبق جدول ۵-۴-۲، $5\times10^{-4}\Omega^{-1}.m^{-1}$ است. برای یك کاربرد مهندسی به‌آن ناخالصی آلومینیم می‌افزایند تا رسانندگی آن به $200\,\Omega^{-1}.m^{-1}$ برسد. تعداد اتمهای آلومینیم درهر مترمکعب چقدر باید باشد؟

حل: ازآنجاکه رسانندگی ذاتی سیلیسیم در مقایسه با $200\,\Omega^{-1}.m^{-1}$ قابل اغماض است، می‌توان فرض کرد که تمام‌رسانندگی ناشی‌از حفره‌هایی است که ازوجود اتمهای پذیرنده ناشی می‌شوند:

$$n_p=\frac{(200\,\Omega^{-1}.m^{-1})}{(0.16\times10^{-18}\,amp.sec)\,(0.0425\,m^2/V.sec)}$$
$$=3\times10^{22}/m^3$$

توضیح. هراتم آلومینیم یك محل‌پذیرنده و درنتیجه یك‌حفره به‌وجود می‌آورد، بنابراین درهرمترمکعب، $3\times10^{22}$ اتم آلومینیم وجود دارد که‌اگر چه‌عدد بزرگی‌است اما درمقایسه باتعداد اتمهای سیلیسیم درهرمترمکعب کوچك است (حدود $0.6$ ppm). (مسئلهٔ ۵-۵-۱ (الف) را ببینید.) ▲

**مثال ۵-۵-۲** مقاومت ویژهٔ خارجی ژرمانیم برای نوعی ترانزیستور $0.02\,\Omega.m$ و تعداد الکترونهای‌رسانش در هرمترمکعب $0.87\times10^{21}$ است. الف) تحرك الکترونها در ژرمانیم چقدر است؟ ب) چه‌عناصری را باید به‌عنوان ناخالصی به‌ژرمانیم افزود تا الکترونهای رسانش تحویل دهند؟

حل: چون رسانندگی خارجی را به‌الکترونها نسبت داده‌ایم (یعنی نوع $n$)

الف)

$$\mu_n = \frac{1}{(0.02\,\Omega\cdot m)(0.87\times10^{21}/m^3)(0.16\times10^{-18}\,amp\cdot sec)}$$

$$= 0.36\,m^2/V\cdot sec$$

ب) گروه V عناصر: Sb، As، P، N

**توضیح.** توجه داشته باشید که تحرك الکترونها بهاینکه کدامیك از عناصر گروه V افزوده شدهاند بستگی ندارد زیرا الکترون پس‌از رسیدن به‌باند رسانش در شبکهٔ بلوری سیلیسیم، مستقل از دهندهٔ خود، حرکت می‌کند.

اگر عناصر گروه VI اضافه شوند در هرمترمکعب تنها $0.4\times10^{21}$ اتم برای ایجاد $0.8\times10^{21}/m^3$ الکترون، کافی خواهدبود زیرا هراتم دوالکترون اضافی‌بدغیر از چهارالکترون لازم برای پیوند وارد عمل می‌کند. ▲

**مثال ۵-۵-۳** میزان فسفر باقیمانده درسیلیسیم خالص ۱ر۰ در هر بیلیون‌است (نسبت وزنی). آیا رسانندگی حاصل، از رسانندگی ذاتی سیلیسیم بیشتر است؟

حل: براساس چگالی (پیوست ب):

$$\text{یك‌مترمکعب سیلیسیم} = 2.33\times10^{6}\,gSi = 2.33\times10^{-4}\,gP$$

$$(2.33\times10^{-4}\,g/m^3)/(30.97\,g/0.6\times10^{24}) = 4.5\times10^{18}/m^3$$

$$\sigma_{ex} = (4.5\times10^{18}/m^3)(0.16\times10^{-18}amp\cdot sec)(0.19\,m^2/V\cdot s)$$

$$= 0.14\,\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$$

درمقابل

(از جدول ۵-۴-۲) $\sigma_{in} = 5\times10^{-4}\,\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$

**توضیح.** برای رسیدن به‌ناخالصی‌کمی‌که برای تولید نیمرسانندگی لازم است، به‌روشهای تولیدکاملا جدیدی نیاز بود. ▲

**مثال ۵-۵-۴** درسیلیسیم برای تولید نیمرسانای نوع $p$، $10^{22}Al/m^3$ وجود دارد. درجه دمایی رسانندگی ذاتی سیلیسیم برابر بیشینهٔ رسانندگی خارجی خواهد بود؟

حل: درحالت اشباع

$$\sigma_{ex} = (10^{22}/m^3)(0.16\times10^{-18}A\cdot sec)(0.0425\,m^2/V\cdot sec)$$

$$= 68\,\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$$

ازجدول ۵-۴-۲، در $20^\circ C$، $\sigma_{in} = 5\times10^{-4}\,\Omega^{-1}\cdot m^{-1}$

رابطهٔ (۵-۴-۳)
$$\frac{5\times 10^{-4}\,\Omega^{-1}\cdot\mathrm{m}^{-1}}{68\,\Omega^{-1}\cdot\mathrm{m}^{-1}}=\frac{\sigma_0 e^{-1.1/2k(293K)}}{\sigma_0 e^{-1.1/2kT}}$$

$$\ln\left(\frac{5\times 10^{-4}}{68}\right)=-11.8=\frac{-1.1\,\mathrm{eV}}{2(86.1\times 10^{-6}\,\mathrm{eV/K})}\left[\frac{1}{293\,\mathrm{K}}-\frac{1}{T}\right]$$

$$T=640\,\mathrm{K}\quad(\text{یا } 367^\circ\mathrm{C})$$

توضیح. کلیترین رابطهٔ رسانندگی در نیمرساناها رابطهٔ زیراست

$$\sigma=\sigma_{in}+(\sigma_n)_{ex}+(\sigma_p)_{ex}$$
$$=(n_{in}q)(\mu_n+\mu_p)+(n_p q\mu_n)_{ex}+(n_p q\mu_p)_{ex}\quad(5\text{-}5\text{-}1)$$

کلا درهرمورد فقط یکی از سه‌عبارت بامعنی است، و بقیه قابل اغماض‌اند. دراین مثال فقط $(\sigma_p)_{ex}$ در $20^\circ\mathrm{C}$ با معنی است. ▲

## □ ۵-۶ وسایل نیمرسانا

درساختن بسیاری از وسایل الکترونیکی از نیمرساناها استفاده شده است و در اینجا تنها به‌چند نمونهٔ آن اشاره می‌شود.

**وسایل رسانش و مقاومت.** قبلا دیدیم که رسانندگی یك رسانای نوری مستقیماً با مقدار نور برخوردکننده بـا آن، تغییرخواهدکرد. این خـاصیت موجب به‌وجودآمـدن وسایل حساس به نور شده است. تابش حتماً نباید مرئی بـاشد، نور فرابنفش یـا فروسرخ نیز می‌تواند فوتونی تأمین کندکه انرژی‌آن بیشتر یا مساوی شکاف انرژی باشد.

وسیلهٔ دوم ترمیستور است. این وسیله نیمرسانـایی است‌کـه مقاومت آن بـرحسب دما مدرج شده است. اگر شکاف انرژی بزرگ باشد به‌طوری‌کـه منحنی $\ln\sigma$ برحسب $1/T$ شیب زیادی داشته باشد، می‌توان ترمیستوری طراحی‌کرد که تغییرات دمـا را تـا $10^{-40}\,^\circ\mathrm{C}$ نشان دهد.

ازآنجا کـه بسیاری از وسایل نیمرسانـا ضریب فشردگی پایینی دارند خـاصیت تراکم‌پذیری آنها زیاد است. آزمایش نشان می‌دهد که بـا کم‌شدن حجم، اندازهٔ شکاف انرژی به‌طور محسوسی‌کاهش می‌یابد. بدیهی است‌که در این صورت تعداد الکترونهایی که می‌توانند از شکاف انرژی، پرش‌کنند زیاد می‌شود. به‌این‌ترتیب با مدرج‌کردن فشار درمقابل مقاومت، می‌توان فشارسنج ساخت.

وسیلهٔ تقویت نور از فعالسازی الکترون، در درجهٔ اول توسط فوتونها و بعد توسط خود الکترونها، استفاده می‌کند. مثلا فـرض‌کنیدکـه منبع نـور بسیار ضعیفی، حتی فقط یـك فوتون، به الکترون ظرفیتی برخوردکند. چشم نمی‌تواند آن را ببیند. ولی اگر این

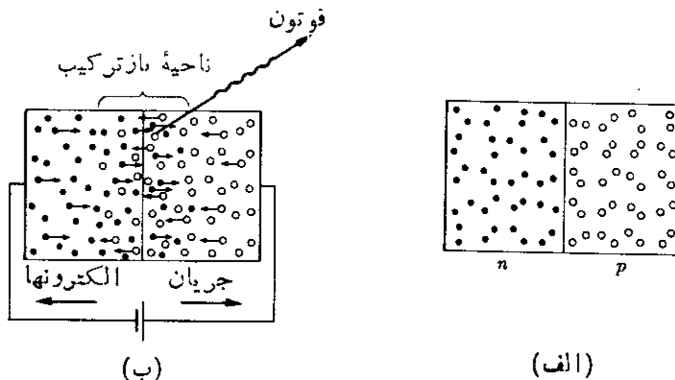
الکترون تا باند رسانش بالا رود و همزمان با آن نیمرسانا درمیدان الکتریکی بسیار قوی قرار گیرد، آن الکترون تا سرعتهای بسیار بالایی‌شتاب می‌گیرد و انرژی بسیاری به‌دست می‌آورد و به‌نوبهٔ خود می‌تواند یك یا چند الکترون دیگر را که آنها نیز تحت تأثیر میدان قوی‌اند فعال‌کنند. از اثر تقویت‌کننده می‌توان استفاده‌کرد و سیگنال نوری بسیار ضعیف‌را تقویت‌کرد. با تمرکز نور، تصویری‌را که تقریباً به‌طور کامل‌تاریك است می‌توان به‌صورت مرئی درآورد.

**وسایل پیوندی (دیودها).** وسایلی‌اندکه ازخاصیت پیوند بین نیمرساناهای نوع $n$ و نوع $p$ استفاده می‌کنند. معروفترین آنها دیودهای نورگسیل (LED) است. کاربردآنها را درقسمت نمایش دهندهٔ عدد (قرمزرنگ) در ماشینهای حساب‌دستی می‌بینیم. کار LED براصلی‌استوار است‌که طرحوارهٔ آن درشکل ۵ـ۶ـ۱ دیده‌می‌شود. حاملهای بارالکتریکی درطرف $n$ و درطرف $p$ پیوندگاه به‌ترتیب الکترونها و حفره‌ها هستند. اگرجریان از وسیله‌ای درجهت نشان داده شده بگذرد، حفره‌های باند ظرفیتی از پیوندگاه عبورکرده و به‌طرف مادهٔ نوع $n$ حرکت می‌کنند؛ برعکس، الکترونهای‌باند رسانش به‌طرف مادهٔ نوع $p$ حرکت می‌کنند. درمجاورت پیوندگاه حاملهای اضافی وجود داردکه باز ترکیب‌شده، لیانی به‌وجود می‌آورند:



$$n+p \rightarrow \text{فوتون} \qquad (۵\text{ـ}۶\text{ـ}۱)$$

اگر از GaAs استفاده شود، فوتونهای گسیل شده در ناحیهٔ بازترکیب، قرمزند؛ GaP

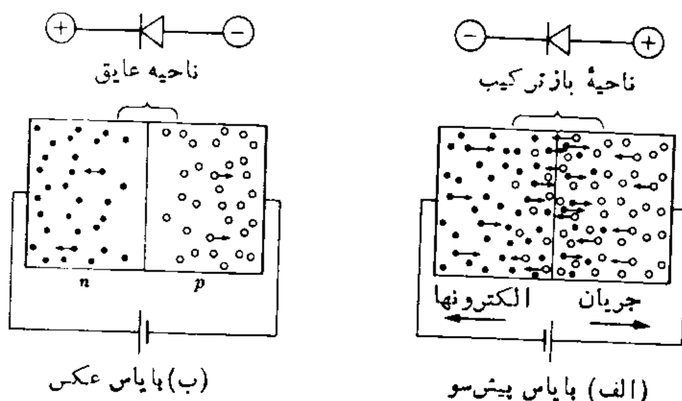



**شکل ۵ـ۶ـ۱** دیود نورگسیل (طرحواره). الف) LED وسیلهٔ پیوندی است بین نیمرساناهای نوع $n$ و نوع $p$؛ ب) وقتی بایاس پیش‌سو در پیوندگاه برقرار می‌شود، حاملهای هردونوع از پیوندگاه عبورکرده در آنجا بازترکیب می‌شوند، درنتیجه از خود فوتون‌گسیل می‌کنند [رابطهٔ (۵ـ۴ـ۴، ب) و (شکل ۵ـ۴ـ۶)].

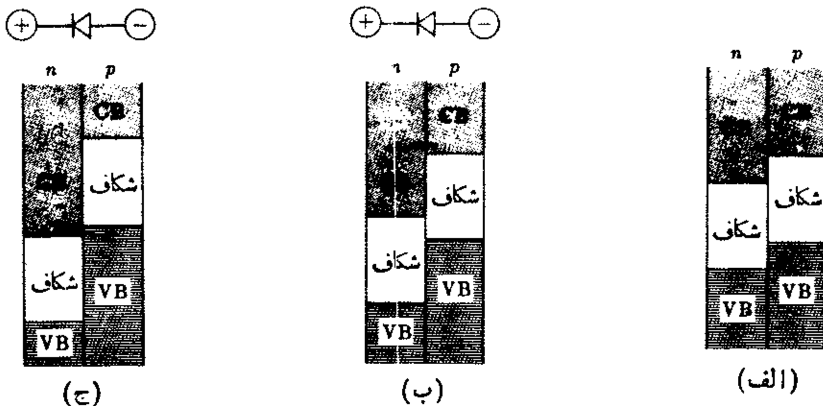
فوتونهای سبز می‌دهد.

پیوندگاه شکل ۵-۶-۱ نیز می‌تواند به‌صورت یکسوکننده عمل کند؛ یعنی «شیر یکطرفهٔ» الکتریکی است که فقط اجازه می‌دهد جریان یک‌طرف عبور کند و به‌طرف دیگر اجازهٔ عبور نمی‌دهد. شکل ۵-۶-۲ مفهوم شکل ۵-۶-۱ را با دادن ولتاژی درجهت عکس یا بایاس بسط می‌دهد. در شکل ۵-۶-۲ (ب) حاملها از هرطرف کشیده می‌شوند تا «ناحیهٔ عایق» بدون حاملی در محل پیوندگاه به‌وجود آید. رسانندگی این ناحیه پایین است. اگر ولتاژ بیشتری اعمال شود، ناحیهٔ عایق به‌آسانی وسیعتر می‌شود. جریان قابل استفاده فقط با بایاس پیش‌سو عبور می‌کند [شکل ۵-۶-۲ (الف)].

پیوندگاه شکل ۵-۶-۲ (ب) با افزایش ولتاژ تا نقطه‌ای فقط جریان بسیار جزئی راعبور می‌دهد. اگر بایاس اولیه به حد کافی بالا باشد و عکس شود، بالای باند ظرفیتی درمادهٔ نوع $p$ ممکن است بالاتر از پایین باند رسانش درمادهٔ نوع $n$ قرار گیرد و درنتیجه الکترونهای باند ظرفیتی بتوانند از $p$ به‌طرف $n$ عبور کنند (شکل ۵-۶-۳). با چنین ولتاژی جریان عکس ممکن است بسیار بالا باشد. بنابراین شیری داریم که در ولتاژ معینی بازمی‌شود. سیلیسیم کاربید (SiC) مادهٔ جدیدی است که از آن بدین‌طریق درمتوقف کننده‌های نوری استفاده می‌شود. اندازهٔ شکاف انرژی آن، از این ماده رسانای بسیار ضعیفی ساخته است، بجزوقتی که تحت نور بسیارشدید قرار می‌گیرد. در آن ولتاژ، جریان به‌زمین انتقال می‌یابد. پس از اتصال به‌زمین بار دیگر به‌صورت عایق درمی‌آید. این‌ماده «شیر اطمینان» الکتریکی است.




**شکل ۵-۶-۲** یکسوکننده (طرحواره). الف) جریان توسط بایاس پیش‌سو حرکت می‌کند زیرا حاملهای بارالکتریکی از پیوندگاه عبور می‌کنند؛ ب) با بایاس معکوس، ناحیهٔ پیوندگاه از حاملهای بار تخلیه می‌شود، رسانندگی خارجی در پیوندگاه ازبین‌می‌رود وفقط مقدارکمی رسانندگی ذاتی باقی می‌ماند.



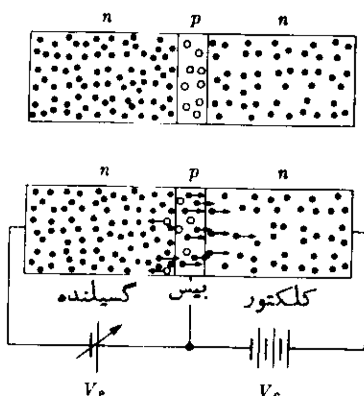

**شکل ۵-۶-۳** دیود زنر (طرحواره). باپاس عکس، شکاف سمت $n$ پیوندگاه را کم می‌کند و شکاف سمت $p$ پیوندگاه را افزایش می‌دهد. جریان اندکی درقسمتهای (الف) و (ب) به‌وجود می‌آید زیرا الکترونهای کمی در باند رسانش (CB) سمت $p$ وجود دارند که به‌عنوان حامل عمل می‌کنند؛ ج) وقتی باپاس به حد کافی زیاد شود، بهمنی از الکترونها می‌توانند مستقیماً ازباندظرفیتی (VB) سمت $p$ پیوندگاه به‌باند رسانش سمت $n$ حرکت کنند. اگرباپاس معکوس کاهش‌یابد و وضعیت به‌حالت (ب) و(الف) برگردد جریان قابل اغماضی عبورمی‌کند. این شکست ولتاژ را می‌توان با کنترل ترازهای ناخالصی عمداً انجام داد.

دیودها، طبق‌اصول فوق، ممکن‌است برای‌انواع مختلف ولتاژهای شکست درگسترهٔ هزارها تا چند ولت طراحی شوند. این وسایل کم‌ولتاژ که دیودهای زنر نامیده می‌شوند به‌طور سودمندی به‌عنوان‌گیت و فیلتر درمدارهای الکتریکی به‌کار می‌روند.

**ترانزیستورها.** همچنان که‌حفره‌هاتوسط باپاس پیش‌سو [شکل ۵-۶-۱ (ب)]، ازپیوندگاه عبور می‌کنند با الکترونهای مادهٔ نوع $n$ طبق رابطهٔ (۵-۴-۴، ب) بازترکیب می‌شوند. به‌همین‌ترتیب، الکترونها با حرکت به‌سمت مادهٔ نوع $p$ با حفره‌ها ترکیب‌می‌شوند. ولی این واکنشها بیدرنگ انجام نمی‌گیرد. درحقیقت تعداد زیادی حاملهای مثبت و منفی تا فواصل مشخصی بعد از پیوندگاه حرکت می‌کنند. تعداد حاملهای اضافی بازترکیب نشده تابعی نمایی از ولتاژ اعمال شدهٔ $V$ است و برای ترانزیستورها اهمیت دارد.

ترانزیستور درطرحهای مهندسی انقلابی پدیدآورده است. کار آن را می‌توان با مدل ساده‌ای شرح داد. ترانزیستور از دوپیوندگاه سری تشکیل‌شده‌است. این پیوندگاهها ممکن است به‌صورت $p$-$n$-$p$ یا $n$-$p$-$n$ باشند که درگذشته اولی تا اندازه‌ای متداولتر بوده است. ما به‌توضیح عمل‌ترانزیستور $n$-$p$-$n$ می‌پردازیم زیرا حرکت الکترونها نسبت به‌حرکت حفره‌ها قابل تصورتر است. به هرحال اصول‌کار هردونوع مشابه است.

ترانزیستور به‌طورکلی‌ازسه‌قسمت گسیلنده (امیتر)، بیس (پایه) وکلکتور (گردآور) تشکیل شده است (شکل ۵-۶-۴). ابتدا پیوندگاه گسیلنده را درنظربگیرید که الکترونها




**شکل ۵-۶-۴** ترانزیستور $(n-p-n)$. تعداد الکترونهایی که از پیوندگاه گسیلنده-بیس $(n-p)$ می‌گذرند نسبت به ولتاژ گسیلنده فوق‌العاده حساس است. اگر ناحیهٔ بیس باریك باشد این حاملهای بار به‌طرف پیوندگاه بیس-کلکتورحرکت می‌کنند سپس با یکدیگر بازترکیب می‌شوند. هرگاه ولتاژ گسیلنده تغییر کند کل جریان گسیلنده به بیس به‌میزان زیادی تقویت خواهد شد.

ازآن به‌ناحیهٔ «بیس» (و ازآنجا به‌طرف کلکتور) می‌روند. همان‌طور که قبلاً گفته شد تعداد الکترونهایی که از این پیوندگاه گذشته و به‌طرف مادهٔ نوع $p$ می‌روند تابعی نمایی از ولتاژ گسیلنده $(V_e)$ است. اگر چه این الکترونها از ابتدا در «بیس» شروع به ترکیب‌شدن با حفره‌ها می‌کنند، اما اگر ناحیهٔ «بیس» باریك یا زمان بازترکیب [$\tau$ در رابطهٔ (۵-۴-۵)] زیاد باشد، الکترونها ضخامت «بیس» را طی کرده به پیوندگاه کلکتور می‌رسند و ازآنجا نیز آزادانه عبور می‌کنند زیرا کلکتور خود یك نیمرسانای نوع $n$ است. کل جریانی که از کلکتور می‌گذرد به‌وسیلهٔ ولتاژ گسیلنده، $V_e$، کنترل می‌شود. هرگاه ولتاژ «گسیلنده» $(V_e)$ تغییر کند جریان درکلکتور، $I_c$، به‌طور نمایی تغییر خواهد کرد و رابطهٔ لگاریتمی زیر برقرار است

$$\ln I_c \simeq \ln I_\circ + \frac{V_e}{B} \qquad \text{(۵-۶-۱، الف)}$$

یا

$$I_c = I_\circ e^{V_e/B} \qquad \text{(۵-۶-۱، ب)}$$

در این رابطه برای هردمای معلوم، $I_\circ$ و $B$ مقادیرثابتی‌اند. به‌این‌ترتیب هرگاه ولتاژ گسیلنده حتی به مقدار اندکی افزایش یابد مقدار جریان به میزان زیادی بالا خواهد رفت، و به‌همین دلیل است که ترانزیستور می‌تواند به‌عنوان تقویت‌کننده مورد استفاده قرار گیرد.

**مثال ۵-۶-۱** روی سولفید به‌عنوان ترمیستور به‌کار می‌رود. برای نشان دادن تغییر $0.001^\circ C$ در $20^\circ C$، مقاومت باید تا چه درجهٔ حساسیتی، $\delta$، اندازه‌گیری شود؟

حل: ازآنجا که شکل هندسی ثابت است

$$\delta = \frac{R_1 - R_2}{R_1} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} = 1 - \frac{\rho_2}{\rho_1} = 1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$$

$$۱-\delta=\frac{\sigma_۱}{\sigma_۲}=\left[\frac{\sigma_\circ e^{-۳٫۷\text{eV}/۲kT}}{\sigma_\circ e^{-۳٫۷\text{eV}/۲k(T+۰٫۰۰۱)}}\right]$$

$$\ln(۱-\delta)=\frac{-۳٫۷\,\text{eV}}{۲(۸۶٫۱\times ۱۰^{-۶}\,\text{eV/K})}\left[\frac{۱}{T}-\frac{۱}{T+۱۰^{-۳}}\right]$$

از آنجا که

$$\frac{۱}{T}-\frac{۱}{T+۱۰^{-۳}}=\frac{(T+۱۰^{-۳})-T}{T(T+۱۰^{-۳})}=\sim\frac{۱۰^{-۳}}{T^۲}$$

$$\ln(۱-\delta)=(-۲۱۵۰۰\,\text{K})\left(\frac{۱۰^{-۳}\,\text{K}}{(۲۹۳\,\text{K})^۲}\right)$$

$$=-۲٫۵\times ۱۰^{-۴}$$

$$\delta=۰٫۰۰۰۲۵\quad(\text{یا } \%۰٫۰۲۵)$$

**توضیح.** دستگاه پل مانندی لازم خواهد بود. ▲

**مثال ۵-۶-۲** در ترانزیستوری، وقتی ولتاژ گسیلنده ۱۷ میلی‌ولت باشد، جریان ۴٫۷ میلی‌آمپر است. در ولتاژ ۲۸ mV جریان به ۲۷٫۵ mA می‌رسد. جریان کلکتور را وقتی که ولتاژ ۳۹ mV می‌شود حساب کنید.

حل: با استفاده از رابطهٔ (۵-۶-۱)

$$\ln ۴٫۷\simeq\ln I_\circ+\frac{۱۷}{B}=۱٫۵۵$$

$$\ln ۲۷٫۵\simeq\ln I_\circ+\frac{۲۸}{B}=۳٫۳۱$$

با حل دو رابطهٔ فوق و استفاده از واحدهای یک‌هزارم، داریم

$$B\simeq ۶٫۲۵\quad \text{و}\quad \ln I_\circ\simeq -۱٫۱۷$$

در ۳۹ میلی‌ولت،

$$\ln I_c\simeq -۱٫۱۷+\frac{۳۹}{۶٫۲۵}\simeq ۵٫۰۷$$

$$I_c\simeq ۱۶۰\ \text{میلی‌آمپر}$$

توضیح. برای کنترل آثار اضافه‌جریان، مهندسان برق رابطهٔ (۵-۶-۱) را اصلاح می‌کنند. ولی روابط اساسی را تغییر نمی‌دهند: تغییرجریــان کلکتور خیلی بیشتر از تغییر ولتاژ سیگنال است. ▲

## مرور و بررسی مطالب

### خلاصه

درمقایسه با فصل‌سوم‌که به‌نظم اتمی و فصل‌چهارم‌که به‌بی‌نظمیها ونواقص‌بلوری‌اختصاص داشت، این‌فصل بیشتر به الکترونها و آزادی حرکت‌آنها در بین اتمها پرداخته است. در فلزات بار الکتریکی به‌وسیلهٔ الکترونها حمل می‌شود ($q = ۰٫۱۶ \times ۱۰^{-۱۸} \mathrm{coul}$)، در مواد یونی بار به‌وسیلهٔ آنیونها (که اتمهایی با الکترون اضافی‌اند) یا کاتیونها، که کمبود الکترون دارند حمل می‌شود. درنیمرساناها حمل بار به‌وسیلهٔ الکترونها و حفره‌ها مشترکاً صورت می‌گیرد. حفره‌های الکترونی حامل بار مثبت‌اندکه با کاتیونها قابل مقایسه‌اند.

فلزات باندهــای انرژی ظرفیتی پرنشده دارند، درحالی‌که هم درعــایقها و هم در نیمرساناها باندهای ظرفیتی پرند. البته درنیمرساناها شکاف موجود به انــدازه‌ای‌کوچك است‌که الکترونها می‌توانند با گرفتن انرژی به‌باند رسانش برسند.

ازآنجا که درفلزات تعداد زیادی الکترون برای رسانندگی‌وجود دارد، رسانندگی درآنها اساساً به‌وسیلهٔ حرکت الکترونها به‌وجود می‌آید وهرعامل‌دیگری ازقبیل‌ارتعاشات گرمایی یا ناخالصی، که ازعیوب بلوری است، میانگین‌مسیرآزاد الکترونهارا کم‌می‌کند و بنابراین سبب‌کاهش رسانندگی (و افزایش مقاومت ویژه) می‌شود.

نیمرساناهــا به‌طور عمده به دو دستهٔ «ذاتی» و «خارجی» تقسیم می‌شوند. دستهٔ‌اول خاصیت رسانندگی را به‌وسیلهٔ فعالسازی الکترونها و عبورآنها از شکاف انرژی به‌دست می‌آورند و مستقل ازوجود ناخالصیهایند. در این‌مورد نوسانات‌گرمایی‌بیش ازهمه معمول است. ازآنجا که تعداد حاملهای بار مطابق با تابعی‌نمایی از دما زیاد می‌شود، تغییرمقدار $n$ در رابطهٔ (۵-۴-۱) اثردما روی تحرك حاملها را تحت‌الشعاع قرار خواهد داد.

الکترونها را می‌توان علاوه برگرما به‌وسیلهٔ تابش نور یا اشعه‌هــای دیگر نیزفعال کرد و به‌باند رسانش رساند. هرالکترون فعال شده درنیمرسانــای ذاتی یك حفره به‌جــا می‌گذارد و به‌این‌ترتیب جفتهای‌الکترون ـ حفره، مشترکاً به‌ایجاد رسانندگی‌کمك می‌کنند. به‌طورکلی تحرك الکترونهــا در باند رسانش از تحرك حفره‌هادرباند ظرفیتی بیشتراست. وسایلی مثل ترمیستورها و رساناهای نوری از رسانندگی ذاتی ناشی از فعالسازی الکترون و عبورآن از شکاف انرژی استفاده می‌کنند.

نیمرساناهای خارجی‌رسانندگی را (۱) ازناخالصیهایی‌که به‌باند رسانش (نوع $n$) الکترون می‌دهند، یا(۲) از ناخالصیهایی‌که ازباند ظرفیتی (نوع $p$) الکترون می‌پذیرند، به‌دست می‌آورند. سیلیسیم و عناصر مشابه‌گروه IV با افزودن عناصرگروه V (یــا VI)

نیمرسانای‌نوع $n$ و با افزودن عناصر گروه III (یا II) نیمرسانای‌نوع $p$ به‌شمارمی آیند. نیمرسانا‌های‌خارجی به‌مهندسان مواد و برق امکان می‌دهند‌که وسایل‌اتصالی مختلفی‌طراحی کنند. یکسوکننده‌ها و ترانزیستورها دونمونه از این وسایل‌اند.

نیمرسانا‌های معیوب دستهٔ خاصی از نیمرسانا‌های خارجی‌اند‌که از نااستوکیومتری دریونهای چندظرفیتی‌ناشی‌می‌شوند. به‌این‌طریق، تعداد زیادی از اکسیدهای فلزی‌خواهند توانست مانند رسانا‌های نوع $n$ یا نوع $p$ عمل‌کنند.

## سؤالات تشریحی

۱. انواع مختلف حاملهای بار را شرح دهید ومقایسه کنید.

۲. عوامل مختلفی را که روی سرعت رانش الکترونها در جامدات اثر می گذارد شرح دهید.

۳. مکانیسم رسانندگی در بعضی‌موارد بانفوذپذیری ارتباط دارد زیرا بافرایندهای‌انتقال سروکار داریم. براساس‌واحدهای آنها وجوه تشابه وتفاوتهای‌بین تحرک‌ونفوذپذیری را ذکر کنید.

۴. چرا مقاومت ویژهٔ برنج بیشتراز مس است؟

۵. چرا رسانندگی فلزات در دماهای بالا کاهش می‌یابد؟

۶. چرا رسانندگی نیمرساناها در دمای بالا افزایش می‌یابد؟

۷. شرح دهیدکه چرا انرژیهایی برای الکترونهای مربوط به‌اتمهای تنها، ممنوع است؟

۸. تفاوت بین رسانا‌های فلزی، عایقها و نیمرسانا‌ها را شرح دهید.

۹. فرض‌کنید که باندهای اول منیزیم همپوشانی نداشته باشند، خواص منیزیم الف) در صورتی‌که شکاف کمتر از ۱ eV شود چه‌تغییری می کند؟ ب) درصورتی‌که بزرگتر از ۴ eV شود چه‌تغییری می کند؟

۱۰. حبابی از لولهٔ‌آب عمودی بالامی‌آید. تشابهی بین آن وحفرهٔ‌الکترونی‌برحسب میدان نیرو و جهت انتقال نشان دهید.

۱۱. تفاوت بین نیمرسانا‌های ذاتی و خارجی را بنویسید.

۱۲. حدس بزنید که آیا بورنیترید باساختار شکل ۵-۴-۳ (ب)، عایق خواهد بود یا نیمرسانا.

۱۳. طرزکار چشم‌الکتریکی را شرح دهید.

۱۴. چه کسری از الکترونها پس‌از $t=\tau$ در باند رسانش باقی می‌مانند؟ پس‌از $t=2\tau$ چطور؟

□ ۱۵. تفاوت بین فلوئورسانی و فسفرسانی را ذکر کنید.

۱۶. ZnS ساختاری‌شبیه به‌آنچه‌که‌درشکل ۵-۴-۳ (ب) دیده می‌شود دارد. فرض‌کنید مقداری اتم فسفر به‌جای اتمهای گوگرد قرار گرفته است. ترکیب حاصل، ازنوع $n$ است یانوع $p$؟

۱۷. فرق بین نیمرساندگی نوع $n$ و نوع $p$ را ذکر کنید.
۱۸. فرق بین ناخالصیهای پذیرنده و دهنده را شرح دهید.
۱۹. چرا شیب منحنی مربوط به‌حاملهای ذاتی درشکل ۵-۵-۳ تندتر از منحنی مربوط به حاملهای ناخالصی است؟
۲۰. مکانیسم اشباع پذیرنده‌ها را طبق شکل ۵-۵-۳ به‌تفصیل شرح دهید.
۲۱. $10^{11}$ اتم منیزیم جانشین همین تعداداتم سیلیسیم دریك میلی‌متر مکعب سیلیسیم شده است. مقایسه کنید که اگر $10^{11}$ اتم ناخالصی آلومینیم در آن‌وجود داشت، دررسانندگی چه تغییری حاصل می‌شد؟
۲۲. میانگین مسیر آزاد الکترونها در نیمرساناهــا در دمای بالا کاهش می‌یابد. ولی این اثر دما روی رسانندگی فقط در گسترهٔ تخلیه (یا اشباع) مشاهده می‌شود. چرا؟
□ ۲۳. $Cu_2O$ به‌طورکلی حاوی یون $Cu^+$ است، ولی مقداری $Cu^{2+}$ نیز در آن موجود است. این ترکیب از نوع $n$ است یا نوع $p$؟
□ ۲۴. اصول دیودنورگسیل را شرح دهید.
□ ۲۵. طرزکار یکسوکنندهٔ سیلیسیمی را شرح دهید.
□ ۲۶. اصول لولهٔ تقویت‌کنندهٔ نور را شرح دهید.

## مسائل

۵-۱-۱ به‌نیمرسانایی‌به‌بعد $0.5$ mm، ولتاژ ۷۰میلی‌ولت اعمال‌شده است تحرك حامل $0.23\ m^2/V{\cdot}sec$ است. سرعت رانش چقدر است؟

جواب: ۳۲ m/sec

۵-۱-۲ نیمرسانایی‌دارای‌مقاومت ویژه $0.0313\ \Omega\cdot m$ است. اگر به‌قطعهٔ ۹ میلی‌متری آن ۱/۲ ولت اعمال شود، سرعت رانش $6.7$ m/sec خواهد بود. در هرمترمکعب آن چند حامل وجود دارد؟

۵-۱-۳ آزمایش تجربی سرعت‌رانش الکترونها را دریك نیمرسانا ۱۴۹ m/sec نشان داده است، به‌شرط آنکه گرادیان ولتاژ ۱۵ V/mm باشد. مقاومت ویژه $0.007\ \Omega\cdot m$ است. غلظت حاملها چقدر است؟

جواب: $9\times10^{21}/m^3$

۵-۱-۴ فلاشی اگر در باتری ۲ سلولـــی به‌کار رود، مقاومتی برابر ۵ اهم دارد. فرض کنید ولتاژ ۳ ولت است. در هردقیقه چندالکترون از این رشته عبور می‌کند؟

۵-۲-۱ دمایی را که در آن مقاومت ویژهٔ نقره $10\ \Omega\cdot nm$ است معین کنید.

جواب: $-88\ ^\circ C$

**۵-۲-۲** در چه دمایی نقره همان مقاومت ویژهٔ طلا در $50\,^\circ C$ را دارد؟

**۵-۲-۳** مقاومت ویژهٔ مس بین $20\,^\circ C$ و $300\,^\circ C$ دوبرابر می‌شود. درچه دمایی مقاومت ویژهٔ آلومینیم برابر بیشترین مقاومت ویژهٔ مس می‌شود؟

جواب: $70\,^\circ C$

**۵-۲-۴** براساس داده‌های جدول ۵-۲-۱ پیوست ج، اثر مس را روی مقاومت ویژهٔ نقره ($\Omega \cdot nm$ بر $a/o$) تخمین بزنید.

**۵-۲-۵** براساس داده‌های مثال ۵-۲-۲، مقاومت ویژهٔ مفرغ $95\ Cu-5\ Sn$ (به‌صورت وزنی) را در $0\,^\circ C$ تخمین بزنید.

جواب: $97 \times 10^{-9}\,\Omega \cdot m$ $(= 97\,\Omega \cdot nm)$

**۵-۲-۶** برای مقاومت بین $0\,^\circ C$ و $25\,^\circ C$، حداکثر ۶٪ تغییر مجاز است. کدامیك از فلزات جدول ۵-۲-۱ این ویژگی را دارد؟

**۵-۲-۷** به‌سیمی آهنی (به‌طول $1.07\ m$ و قطر $0.53\ mm$) در $20\,^\circ C$، ۲۵ ولت اعمال شده است. الف) آمپر اولیه چقدر است؟ در $910\,^\circ C$، درست زیر دمای تبدیل $bcc \leftrightarrow fcc$ آمپر چقدر است؟ ب) تغییر طول تقریبی بین $20\,^\circ C$ و $910\,^\circ C$ چقدر است؟ بین $20\,^\circ C$ و $915\,^\circ C$ چطور؟ (مثال ۳-۴-۱ را مرور کنید. ضریب انبساط گرمایی آهن $bcc$ مستقیماً به‌تغییر شعاع مربوط خواهد بود.)

جواب: الف) $53\ A$، $11\ A$؛ ب) $16\ mm$، $11\ mm$. (از این مسئله برای سؤال تشریحی ۲۲ مربوط به‌فصل ۹ استفاده کنید.)

**۵-۴-۱** ذره‌ای ازسیلیسیم دارای ابعاد $1\,mm \times 1\,mm \times 0.1\,mm$ است. اگر ولتاژ اعمال شده بر آن، ۳۷ میلی ولت باشد، سرعت رانش الکترونها ازمیان بعد کوتاهتر چقدر خواهد بود؟

جواب: $70\ m/sec$

**۵-۴-۲** ژرمانیم خالص دارای رسانندگی $2\,\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ است. تعداد حاملهای منفی، $n_n$، و حاملهای مثبت، $n_p$، مساوی است. چه کسری از رسانندگی به‌سبب الکترونها و چه کسری به‌سبب حفره‌های الکترونی است؟

**۵-۴-۳** چه کسری از بار توسط حفره‌های الکترونی گالیم آرسنید ($GaAs$) که نیمرسانای ذاتی است حمل می‌شود؟

جواب: ۰٫۰۴۳ (یا ۴٫۳٪)

**۵-۴-۴** برای آنکه رسانندگی نیمرسانای ذاتی سیلیسیم به $1.1\,\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ برسد،

چه تعداد حامل الکترونی (و حفرهٔ الکترونی) لازم است؟

**۵-۴-۵** مقاومت‌ویژهٔ نیمرسانایی که درهرمترمکعب $۱۰^{۲۱}$ بارمنفی (و تعداد کمی‌بارمثبت) دارد، $Ω.m$ ۰٫۰۱۶ است. الف) رسانندگی چقدراست؟ ب) تحرك الکترون چقدر است؟ ج) اگر گرادیان پتانسیل $5\ mV/mm$ باشد سرعت رانش چقدر است؟ در صورتی که ۰٫۵ $V/m$ باشد چطور؟

جواب: الف) $۶۲٫۵\ Ω^{-۱}.m^{-۱}$؛ ب) $۰٫۳۹\ m^۲/V.sec$؛ ج) $۱٫۹۵\ m/sec$، $۰٫۱۹۵\ m/sec$

**۵-۴-۶** براساس داده‌های جدول ۵-۴-۲ کدامیك بیشتر است: ۱) رسانندگی حاصل از الکترونها درنیمرسانای‌ذاتی Inp، یا (۲) رسانندگی‌حفره‌های‌نیمرسانای‌ذاتی InAs؟

**۵-۴-۷** سیلیسیم خالص درهر سلول واحد ۳۲ الکترون ظرفیتی دارد (۸ اتم هر کدام ۴ الکترون). مقاومت ویژهٔ آن $۲ \times ۱۰^۳\ Ω.m$ است. چــه کسری از الکترونهای ظرفیتی رسانایند.

جواب: یکی از $۱٫۵ \times ۱۰^{۱۲}$

**۵-۴-۸** در دمــایی بــالا، از هر $۱۰^۹$ الکترون ظرفیتی ژرمانیم یکی در بــاند رسانش قرار دارد. رسانندگــی چقدر است؟ (ژرمانیم همــان ساختار سیلیسیم را دارد، ولی بــا $(α = ۰٫۵۶۶\ nm)$.

**۵-۴-۹** تحرك الکترونهــا در سیلیسیم $۰٫۱۹\ m^۲/V.sec$ است. الف) برای اینکــه سرعت رانش الکترونهایی که از ذرهٔ ۲ میلی‌متری Si عبور می‌کنند، $۰٫۷m/sec$ باشد، ولتاژ لازم چقدراست؟ ب) غلظت‌الکترونی درباند رسانش چقدر باید باشد تا از حاملهای بارمنفی رسانندگی $۲۰\ Ω^{-۱}.m^{-۱}$ ایجاد شود؟ ج) اگر نــاخالصی وجود نداشته باشد، کل رسانندگی این سیلیسیم چقدر خواهد بود؟

جواب: الف) $۷٫۴\ mV$؛ ب) $۶٫۶ \times ۱۰^{۲۰}/m^۳$؛ ج) $۲۴٫۵Ω^{-۱}.m^{-۱}$.

**۵-۴-۱۰** رسانندگی‌سیلیسیم در $۲۰°C$ $(۶۸°F)$، برابر $۵ \times ۱۰^{-۴}Ω^{-۱}.m^{-۱}$ است. رسانندگی آن را در $۳۰°C$ تخمین بزنید.

**۵-۴-۱۱** برای آنکه مقدار رسانندگی ژرمانیم در $۲۰°C$ $(۶۸°F)$ با ضریب دو کاهش یابد، تاچه دمایی‌باید آن را سرد کرد؟

جواب: $۶°C$

**۵-۴-۱۲** نیمرسانایی در $۲۰°C$ دارای رسانندگی $۷Ω^{-۱}.m^{-۱}$ و در $۶۰°C$ دارای رسانندگی $۲۰\ Ω^{-۱}.m^{-۱}$ است. اندازهٔ شکاف انرژی چقدر است؟

**۵-۴-۱۳** نیمرسانایی ذاتی در $10°C$ دارای رسانندگی $111\Omega^{-1}.m^{-1}$ و در $17°C$ دارای رسانندگی $172\Omega^{-1}.m^{-1}$ است. الف) شکاف انرژی چقدر است؟ ب) رسانندگی در $13{,}5°C$ چقدر است؟

جواب: الف) $0{,}88\ eV$؛ ب) $138\Omega^{-1}.m^{-1}$.

**۵-۴-۱۴** نیمرسانایی ذاتی در $5°C$ دارای رسانندگی $390\ \Omega^{-1}.m^{-1}$ و در $25°C$ دارای رسانندگی $1010\ \Omega^{-1}.m^{-1}$ است. الف) اندازهٔ شکاف انرژی چقدر است؟ ب) رسانندگی در $15°C$ چقدر است؟

☐ **۵-۴-۱۵** بامراجعه به مثال ۵-۴-۵، فرض کنید فسفر بازمان بازترکیب $0{,}04\ sec$ به کار رفته است. وقتی تصویر بعدی دیده می‌شود چه کسری از شدت نور باقی مانده است؟

جواب: ۰٫۴۴

☐ **۵-۴-۱۶** مادهٔ فسفرسانی درمعرض نور فرابنفش قرارگرفته است. شدت نور گسیل شده در ۳۷ دقیقهٔ اول پس‌ازبرداشتن نور فرابنفش ۲۰٪ کاهش می‌یابد. الف) از زمان برداشتن نور فرابنفش چه‌مدتی طول‌می‌کشد تا نور منتشر شده به ۲۰٪ شدت اولیهٔ خود برسد (یعنی ۸۰٪ کاهش یابد)؟ ب) برای فقط ۱٪ شدت اولیه چطور؟

**۵-۴-۱۷** مادهٔ فسفرسانی باید پس‌از ۲۴ ساعت، شدت ۵۰ (با واحد اختیاری) را داشته باشد و پس‌از ۴۸ ساعت این شدت به ۲۰ برسد. براساس این ارقام، شدت اولیه چقدر باید باشد؟ (بدون ماشین‌حساب حل کنید)

جواب: ۱۲۵

**۵-۴-۱۸** زمان بازترکیب ماده را درمسئلهٔ قبل بااستفاده از ماشین‌حساب به‌دست آورید.

**۵-۵-۱** سیلیسیم دارای چگالی $2{,}33\ Mg/m^3 (= 2{,}33\ g/cm^3)$ است. الف) غلظت اتمهای سیلیسیم درهرمترمکعب چقدر است؟ ب) برای تبدیل سیلیسیم به‌نیمرسانای نوع $n$ با رسانندگی $100\ mho/m$ وتحرک الکترونی $0{,}19\ m^2/V.sec$، فسفر به‌آن اضافه شده است. در هرمتر مکعب غلظت الکترونهای دهنده چقدر است؟

جواب: الف) $5\times10^{28} Si/m^3$؛ ب) $3{,}3\times10^{21}/m^3$

**۵-۵-۲** به‌ازای هراتم آلومینیم در مثال ۵-۵-۱ چه تعداد اتم سیلیسیم وجود دارد؟

**۵-۵-۳** نیمرسانای ذاتی ژرمانیم با ذوب کردن $3{,}22\times10^{-6}g$ آنتیموان (Sb) با $100\ g$ ژرمانیم تشکیل شده‌است. الف) نیمرسانا ازنوع $n$ است یا ازنوع $p$؟ ب) غلظت آنتیموان‌در ژرمانیم‌را (برحسب $cm^3$/اتم) حساب کنید. (چگالی‌ژرمانیم $5{,}35\ Mg/m^3$ یا $5{,}35\ g/cm^3$ است.)

جواب: الف) نوع $n$؛ ب) $۸٫۵ \times ۱۰^{۲۰}/m^۳$.

**۵-۵-۴** گالیم ارسنید با افزایش ۰٫۰۰۰۰۰۱ a/o فسفر به‌صورت نیمرسانای خارجی درآمده است (نسبت استوکیومتری Ga/As حفظ شده است.) رسانندگی خارجی را در هنگام تخلیه‌حساب کنید.

**۵-۵-۵** برای تبدیل سیلیسیم به‌نیمرسانا، ناخالصی آلومینیم نقش حساسی دارد. فرض کنید فقط ۱۰ ppb (۰٫۰۰۰۰۰۰۱ a/o) باقی‌بماند. آیا در ۲۰°C، رسانندگی خارجی آن را رسانندگی ذاتی سیلیسیم بیشتر است یا کمتر؟

جواب: بیشتر (۴٫۳ در مقابل $۵ \times ۱۰^{-۴} \Omega^{-۱}.m^{-۱}$)

**۵-۵-۶** بامراجعه به‌مسئلهٔ ۵-۵-۵، در چه‌دمایی ۱٪ از رسانندگی ذاتی خواهد بود؟

**۵-۵-۷** سه‌گرم‌سیلیسیم نوع $n$ که بافسفر رسانندگی $۶۰۰ \Omega^{-۱}.m^{-۱}$ به‌وجودآورده، با سه‌گرم سیلیسیم نوع $p$ که با آلومینیم رسانندگی $۶۰۰ \Omega^{-۱}.m^{-۱}$ به‌وجود آورده ذوب شده است. الف) رسانندگی حاصل‌چقدر است؟ ب) این رسانندگی از نوع $p$ است یا از نوع $n$؟

جواب: الف) $۲۳۰ \Omega^{-۱}.m^{-۱}$؛ ب) نوع $p$.

**۵-۵-۸** سیلیسیم ($۱۰^{۲۱}/m^۳$) با GaAs به‌صورت محلول جامد درآمده است. فرض کنید جانشین‌تعدادمساوی از اتمهای Ga و As شده باشد، الف) رسانندگی برآورد شده چقدر است؟ ب) فرض کنید $۱۰^{۲۱} Si/m^۳$ فقط جانشین اتم آرسنیك شود. رسانندگی برآورد شده چقدر است؟

**۵-۵-۹** با مراجعه به‌مثال ۴-۳-۱، الف) اکسید از نوع $n$ است یا نوع $p$؟ ب) درهر $mm^۳$ چه‌تعداد حامل بارالکتریکی وجود دارد؟

جواب: الف) نوع $p$؛ ب) $۷٫۸ \times ۱۰^{۱۸}/mm^۳$.

**۵-۵-۱۰** آزمایش نشان داده است که در $Fe_{<1}O$، ۹۹٪ از بار توسط الکترونها (و بقیه توسط یونها) حمل می‌شود، اگر اکسید موجود در مسئلهٔ ۵-۵-۹ دارای رسانندگی $۹۳ \Omega^{-۱}.m^{-۱}$ باشد، تحرك حفره‌های الکترونی چقدر است؟

□ **۵-۶-۱** مقاومت ویفرسیلیسیمی در ۲۵٫۱°C برابر ۱۰۳۱ Ω است. بدون‌آنکه روش اندازه‌گیری تغییر کند مقاومت تا ۱۰۲۹ Ω کاهش می‌یابد. تغییر دما چقدر است؟ شکاف انرژی سیلیسیم ۱٫۱ eV است.

جواب: $+۰٫۰۳$ °C

☐ ۵-۶-۲ دمای Inp چقدر باید بالا رود تا مقاومت آن به نصف آنچه در C°۰ بود برسد؟ شکاف انرژی آن eV ۱٫۳ است.

☐ ۵-۶-۳ ترانزیستوری در گسیلنده‌ای بین ۱۰ میلی‌ولت و ۱۰۰ میلی‌ولت کار می‌کند. در ولتاژ کمتر، جریان کلکتور ۶ میلی‌آمپر است؛ در ولتاژ بالاتر به ۶۰۰ میلی‌آمپر می‌رسد جریان را در هنگامی که ولتاژ گسیلنده mV ۵۰ است تخمین بزنید.

جواب: mA ۴۶

☐ ۵-۶-۴ با مراجعه به‌مثال ۵-۶-۲، اگر ولتاژ گسیلنده دوبرابر شود و از ۱۷ به ۳۴ میلی‌ولت برسد جریان کلکتور با چه ضریبی افزایش خواهد یافت؟

# ٦

# فلزات تك‌فاز

## چشم‌انداز فصل

فلزات نسبت به‌دو دستهٔ اصلی دیگر مواد یعنی پلی‌مرها و سرامیکها، نسبتاً ساده‌ترند، زیرا تعداد زیادی از فلزات فقط حاوی یك نوع اتم‌اند (یا محلول جامدی مثل برنج‌اند که در آن روی به‌جای مس قرار می‌گیرد بدون آنکه تغییری در ساختار به‌وجود آید). بنابراین ابتدا چگونگی ارتباط بین ساختار و فلزات را بررسی می‌کنیم، سپس در فصل ۷ و ۸ به‌ترتیب به‌بررسی پلاستیکها و سرامیکها می‌پردازیم.

هنگامی که تغییر شکل کشسان و پلاستیکی و شکست حاصل از آن را درنظر می‌گیریم، باید هم به‌ساختار بلور وهم به‌میکروساختار توجه کنیم. ویژگی جدیدی ارائه خواهد شد، که عبارت است از امکان تابکاری فلز و از بین بردن عیوب ساختاریی، که قبلا به‌وجود آمده‌اند؛ این امر می‌تواند تأثیر مهمی روی خواص داشته باشد.

## هدف از مطالعه

۰۱ آشناشدن با مقادیر مربوط به‌خواصی که معمولا با آنها برخورد دارید، درمورد فلزات تابکاری شده، مثل مس و نیکل، وآلیاژهای تابکاری شده مثل برنج و Cu–Ni.

۰۲ تشریح میکروساختارهای مختلف تک‌فاز و درك اصول رشد دانه.

۰۳ گسترش‌معلومات شما درمورد رفتار کشسان، فراتر ازآنچه‌در بخش۱ـ۲ آمده است، که الف) سه‌نوع اصلی مدول (یانگ، برشی وکشیدگی) و ب) تغییر با دما، استحکام پیوند، و جهتگیری بلوری را شامل می‌شود.

۰۴ دانستن منشأ محلول سختی، کرنش سختی، تابکاری برحسب نابجایی، و تبلور مجدد.

۰۵ کاربرد دانسته‌های شما در مورد محلول‌سختی، کرنش سختی و تبلورمجدد برای انتخاب مواد و فرایندهای مربوط به‌کسب خواص.

۰۶ پیش‌بینی رفتار فلزات در حین‌کارهنگامی که در دماهای بالا، درمعرض بار ضربه‌ای، بار چرخه‌ای، و در محیطهای تابشی قرار می‌گیرند.

## ۶ـ۱ آلیاژهای تک‌فاز

بسیاری از مـواد پرمصرف تنها یك‌فاز دارند. ممکن است اینها فلزات خالص تجارتی، یـا فقط یك جزء باشند. مثل‌مس برای‌سیمکشی، روی برای‌پوشش‌دادن فولاد رویینه‌کاری شده و آلـومینیم بـرای ظروف خانگی. ولی در مـوارد متعدد دیگر ، جزء دومی عمداً به‌فلز اضافه می‌شود تا خواص را بهترکند. این نـوع تـرکیبات حاوی فلزات را آلیاژ می‌گویند.

آلیاژها اگر ازحدحلالیت جامدفراتر نروند فلزات تک‌فازند. برنج (آلیاژ تک‌فاز مس و روی)، مفرغ (آلیاژی مشابه ازمس وقلع)، و آلیاژهای مس ونیکل نمونه‌هایی از آلیاژهای‌تک‌فازند که دراین‌فصل مطالعه خواهیم‌کرد. آلیاژهای چندفاز یا پلی‌فاز، حاوی فازهای بیشتری‌اند زیرا ازحد حلالیت فاز گذشته‌اند. قسمت اعظم فولادهـا مثل بسیاری از فلزات دیگر، آلیاژهای چند فازندکه درفصل بعدآنها را شرح خواهیم داد.

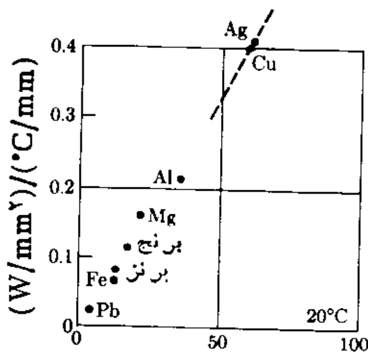
**خواص آلیاژهای تک‌فاز.** همان‌طورکه درشکلهای ۶ـ۱ـ۲ و ۶ـ۱ـ۳ (صفحات ۲۳۹ و۲۴۵) برای برنج ومحلول جامد Cu–Ni دیده‌می‌شود خواص آلیاژها باخواص‌فلزات خالص‌تفاوت دارد. افزایش استحکام وسختی به‌علت وجود اتمهای جسم حل‌شدنی است که درحین تغییرشکل پلاستیکی مانع حرکت نابجاییها در بلور می‌شود. بعداً (دربخش ۶ـ۴)

خواهیم دید که علت این مانع آن است که نابجاییها نمی‌توانند به‌سادگی از اتمهای آلیاژی بگذرند.

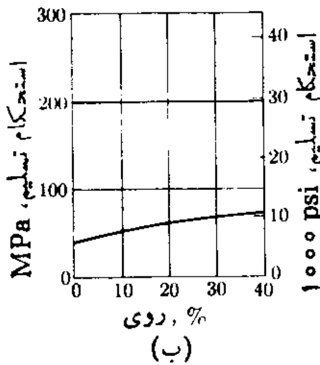
مقدار بسیار کمی از ناخالصیها، رسانندگی الکتریکی فلزات را کاهش می‌دهند، زیرا اتمهای خارجی در میدان الکتریکی داخل شبکهٔ بلور نایکنواختی به‌وجود می‌آورد. بنابراین الکترونها انحراف و بازتاب بیشتری را همراه با کاهش بعدی در میانگین مسیر آزاد تجربه می‌کنند (بخش ۵-۲).

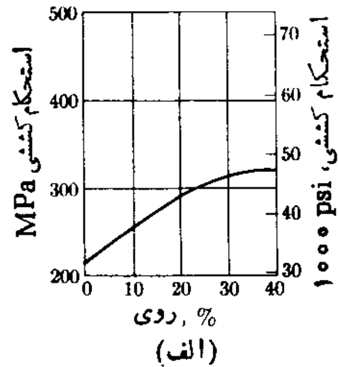
در هر فلز، الکترونها قسمت اعظم انرژی را برای رسانش گرمایی حمل می‌کنند. بنابراین ارتباطی بین رسانندگی گرمایی و الکتریکی وجود دارد. [(ه) و (و) مربوط به‌شکلهای ۶-۱-۲ و ۶-۱-۳ را مقایسه کنید.] درحقیقت چندی قبل دریافتند که در بیشتر فلزات $k/\sigma$ در دمای معمولی ($\sim 20°C$) تقریباً $7 \times 10^{-6} W \cdot \Omega/°C$ است که در آن رسانندگی گرمایی، $k$، و رسانندگی الکتریکی، $\sigma$، به‌ترتیب برحسب $(W/m^2)/(°C/m)$ و $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ نوشته می‌شوند (شکل ۶-۱-۱). این نسبت را نسبت ویدمان-فرانتس (W - F) می‌نامند. از آنجا که داده‌هایی از مقادیر مقاومت الکتریکی فلزات در دماهای مختلف به‌راحتی در دسترس است برای به‌دست آوردن مقدار رسانندگی که مشکلتر در دسترس قرار می‌گیرد، نسبت W - F قاعدهٔ سرانگشتی مناسبی است.

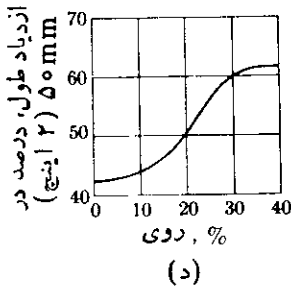
**میکروساختارهای آلیاژهای تك‌فاز.** دانه‌ها در بخش ۴-۴ به‌عنوان بلورهای مستقل تعریف شدند. موادی که دانه‌های بسیار دارند تحت‌عنوان چند دانه‌ای یا بهتر بگوییم چند بلورین تعریف می‌شوند. بلورهای مجاور جهتگیری نامتشابهی دارند به‌طوری که مرز دانه‌ای وجود دارد (شکل ۴-۴-۷). میکروساختار فلزات تك‌فاز می‌تواند با اندازه، شکل، و جهتگیری دانه‌ها تغییر کند (شکل ۶-۱-۴). این جنبه‌ها کاملا مستقل نیستند زیرا شکل و اندازهٔ بلورها هردو نتیجهٔ رشد دانه است. همچنین شکل دانه معمولا به‌جهتگیری بلورین دانه‌ها درحین رشد بستگی دارد.

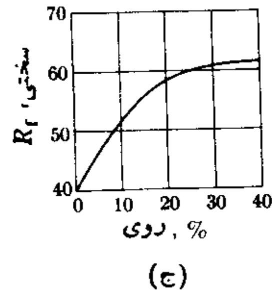


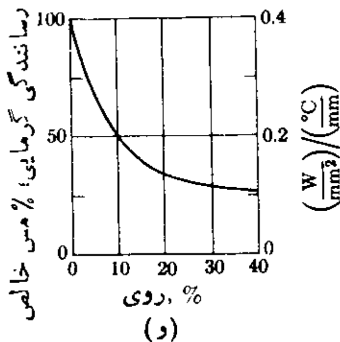

**شکل ۶-۱-۱** رسانندگی فلزی (گرمایی در مقابل الکتریکی در $20°C$). از آنجا که الکترونها انرژی گرمایی را انتقال می‌دهند، یك رسانای الکتریکی خوب، از نظر گرمایی نیز رسانای خوبی است. (نسبت W - F ($k/\sigma$) به‌دمای مطلق بستگی دارد. این بستگی درمورد فلزات خالص بهترین صورت را دارد. ولی شامل غیرفلزات نمی‌شود.)

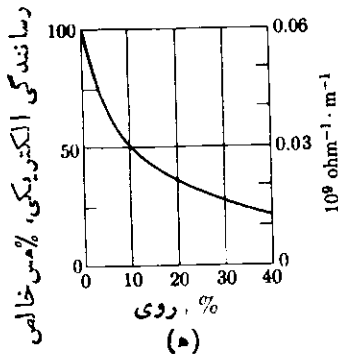


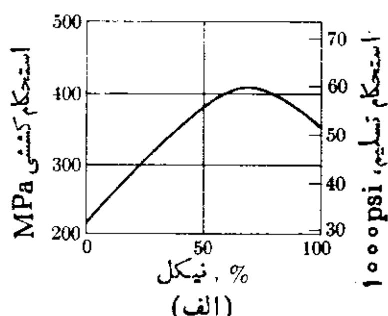



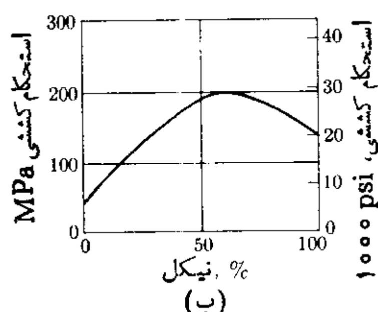



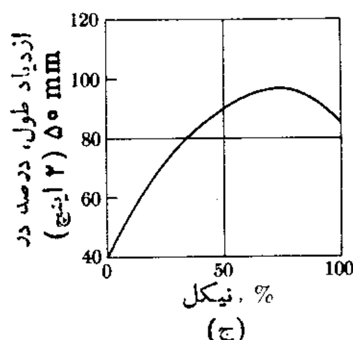



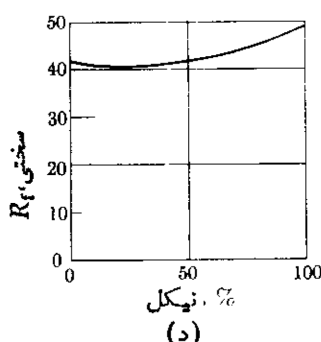

**شکل ۶-۱-۲** خواص مکانیکی و فیزیکی برنجهای تابکاری شده. حد حلالیت روی در مس fcc تقریباً ۴۰% است.

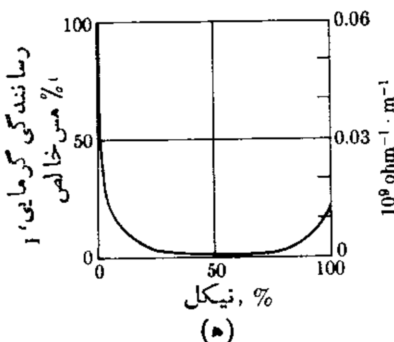
اگر چه صحبت از اندازهٔ دانه برحسب قطر معمول است ولی به‌ندرت دانه‌ای از فلزات تک‌فاز یافت می‌شود که کروی باشد. درعوض دانه‌ها باید کاملا فضا را پرکنند و نیز سطح کل مرز دانه‌ها را کمینه نگه‌دارند. این امر درشکلهای ۴-۴-۸ و ۶-۱-۴(الف) دیده می‌شود که در آنها دانه‌ها به‌صورت هم‌محور توصیف شده‌اند زیرا در سه جهت مختصات ابعادی تقریباً یکسان دارند. علاوه‌بر دانه‌های هم‌محور، سایر اشکال دانه که معمولا با آنها

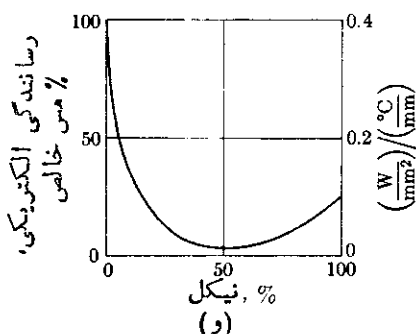


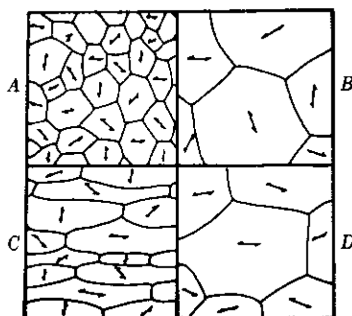




**شکل ۶ـ۱ـ۳** خواص مکانیکی و فیزیکی آلیاژهای مس ـ نیکل تابکاری شده. مس و نیکل مجموعهٔ کاملی از محلولهای جامد را تشکیل می‌دهند.

برخورد می‌کنیم، عبارت‌اند از صفحه‌ای شکل [شکل ۶ـ۱ـ۴ (ج)]، ستونی، یا شاخه‌ای (یعنی شبیه به‌درخت). در این کتاب هیچ کوششی برای اسلوب دادن به‌آنها نخواهد شد.

جهتگیری دانه‌ها در فلز به‌طور کلی کاملا تصادفی است [شکل ۶ـ۱ـ۲(الف)]. ولی استثناهایی هم‌وجود دارد که می‌تواند از نظر خواص مهندسی اهمیت داشته باشد. مثلاً جهات [۱۰۰] آهن نفوذپذیری مغناطیسی بیشتری نسبت به‌سایر جهات دارند. بنابراین اگر جهتگیری دانه‌ها، درون صفحهٔ چندبلورین ترانسفورماتور تصادفی نباشد، طی فرایندی جهتگیری ترجیحی را به‌دست می‌آورد، به‌صورتی که ترجیحاً جهت [۱۰۰] با میدان




**شکل ۶-۱-۴** متغیرهای میکروساختار فلزات تك فاز. اندازهٔ دانه (الف نسبت به ب). شکل دانه (الف نسبت به ج). جهتگیری ترجیحی (ب نسبت به د).

مغناطیسی در یك راستا قرار گیرد. در این‌صورت مـی‌توان به‌طورقـابل توجهی کارکرد ترانسفورماتور را مؤثرتر کرد، متالورژی‌دانان آموخته‌اند که چگونه این کار را با حاصل بیلیونها دلار صرفه‌جویی در توزیع قدرت الکتریکی، انجام دهند.

**مثال ۶-۱-۱** استحکام کششی آلیاژ مس ـ نیکل باید بیشتر از $290\,\text{MPa}$ و رسانندگی گرمایی آن باید بیشتر از $0.056\ (\text{W/mm}^2)/(^\circ\text{C/mm})$ باشد. آلیاژی را ازشکل ۶-۱-۳ انتخاب کنید.

حل:

$$\%19 < x < \%100\ \text{Ni}$$ ‏$S_t$، استحکام کششی

$$\%0 < x < \%25\ \text{Ni}$$ ‏$k$، رسانندگی گرمایی

و

$$\%85 < x < \%100\ \text{Ni}$$

گسترهٔ مشخصات $\quad \%19 - \%25\ \text{Ni}$

و

$$\%85 - \%100\ \text{Ni}$$

$80\ \text{Cu} - 20\ \text{Ni}$ را انتخاب کنید، زیرا نیکل از مس گرانتر است.

توضیح. اگر کسی سکه‌هایی را از جیب خود برداشته آزمایش کند در می‌یابد که نیکل بسیار گرانتر از مس است.

ویژگیهای آن به‌ندرت درحد بالایی گستره قرار می‌گیرد. ▲

**مثال ۶-۱-۲** آهن را به‌عنوان رسانای گرمـایی در $300\ ^\circ\text{C}$ به‌کار می‌بریم. رسانندگی آن، درپیوست ج، برای $20^\circ\text{C}$ آمده است. اگر $k/\sigma$ متناسب با K باشد مقدار $k_{300^\circ\text{C}}$ را تخمین بزنید.

حل: از جدول ۵-۲-۱ و معادلهٔ (۵-۲-۱)

$$\sigma_{۳۰۰°C}=\frac{۱}{\rho_{۳۰۰°C}}=\frac{۱}{[۹۰\times ۱۰^{-۹}\mathrm{ohm.m}][۱+(۰٫۰۰۴۵/°C)(۳۰۰°C)]}$$

$$=۴٫۷\times ۱۰^{۶}\Omega^{-۱}.\mathrm{m}^{-۱}$$

از آنجاکه نسبت W-F در ۲۰°C تقریباً $۷\times ۱۰^{-۶}\,W.\Omega/°C$ است

$$W\text{-}F_{۳۰۰°C}=(\sim ۷\times ۱۰^{-۶}W.\Omega/°C)(۵۷۳\,K/۲۹۳\,K)$$

$$=\sim ۱۳٫۷\times ۱۰^{-۶}W\Omega/°C$$

$$k_{۳۰۰°C}\sim\sigma(W\text{-}F_{۳۰۰°C})=$$

$$\frac{(۴٫۷\times ۱۰^{۶}\Omega^{-۱}.\mathrm{m}^{-۱})(\sim ۱۳٫۷\times ۱۰^{-۶}W.\Omega/°C)}{۱۰^{۳}\mathrm{mm/m}}$$

$$=\frac{\sim ۰٫۰۶۴(W/\mathrm{mm}^{۲})}{°C/\mathrm{mm}}$$

**توضیح.** مقدار تجربی به‌دست آمده که درکتاب مرجع فلزات گزارش شده در ۳۰۰°C برابر با $۰٫۰۶(W/mm^{۲})/(°C/mm)$ است. نسبت W-F برای مواد غیرفلزی‌که الکترون برای انتقال انرژی گرمایی در دسترس ندارند، به‌کار نمی‌رود. ▲

**مثال ۶-۱-۳** اگر به‌میله‌ای بار ۲۵۰ kg وارد آید، باید مقاومتی کمتراز ۰٫۱ Ω/m و کرنش کششی کمتراز ۰٫۰۰۱ m/m داشته باشد؛ و نباید به‌طور پلاستیکی تغییر شکل دهد. کمینهٔ قطرلازم برای میله‌ای ازجنس فلز مونل (۷۰Ni-۳۰Cu) چقدر است؟ اگر میله ازبرنج (۷۰Cu-۳۰Zn) باشد چطور؟

حل: داده‌های پیوست ج و شکلهای ۶-۱-۲ و ۶-۱-۳

| | ۷۰ Ni - ۳۰ Cu | ۷۰ Cu - ۳۰ Zn |
|---|---|---|
| $S_y$, MPa | ۱۹۵ | ۷۰ |
| $\rho$, Ω . m | $۴۸۰\times ۱۰^{-۹}$ | $۶۲\times ۱۰^{-۹}$ |
| $E$, MPa | ۱۸۰۰۰۰ | ۱۱۰۰۰۰ |

برای ۰٫۱ Ω/m و با جابه‌جایی رابطهٔ (۱-۴-۳)

| | | |
|---|---|---|
| $d=\sqrt{(۴\rho L)/(\pi ۰٫۱)}$ | ۲٫۵ mm | ۰٫۸۹ mm |

برای $0.001\ m/m$ و با $F = (250 \times 9.8\ N)$

$d = \sqrt{(4F)/\pi E(0.001)}$ (مونل) **۴٫۲ mm** (برنج) ۵٫۳ mm

برای آنکه تغییرشکل پلاستیکی بەوجود نیاید و با $F = (250 \times 9.8\ N)$

$d = \sqrt{4F/\pi S_y}$ (مونل) ۴٫۰ mm (برنج) **۶٫۷ mm**

توضیح. کمینهٔ قطر با حروف سیاه نشان داده شده است. ارقام کوچکتر از آن هر دو شرط را برآورده نمی‌کنند. ▲

## □ ۶-۲ انجام فرایند روی آلیاژهای تک‌فاز

انجام فرایند بر روی بیشتر فلزات ازطریق ذوب‌کردن است. درحالت مذاب ناخالصیهای ناخواسته جدا و فلز ازنظر شیمیایی تصفیه خواهد شد. اگر قرار باشد آلیاژهایی مثل برنج یا مفرغ تولید شوند به‌ترتیب روی یا قلع به‌مس مذاب افزوده می‌شود. درحالت مذاب روی (یا قلع) به‌سادگی حل‌شده و به‌طور یکنواخت در فلز مذاب پراکنده می‌شود.

سپس، فلز درقالبی ریخته می‌شود تا منجمد شود. قالب ممکن است به‌شکل محصول نهایی ساخته شده، مثل زنگ مفرغی بزرگ، یا ممکن است قطعهٔ ریختگی منجمد شده برای شکل‌گیری نهایی به‌ماشینکاری نیاز داشته باشد (شکل ۶-۲-۱). در حالات دیگر قالب به‌صورت شمش است که شمش‌بلوك منجمد شده‌ای از فلز (یا از سایر مواد) است که بعداً توسط کار مکانیکی یا شکل‌دادن تغییرشکل پیدا کرده و به‌میله، سیم، لوله، ورق، قطعهٔ

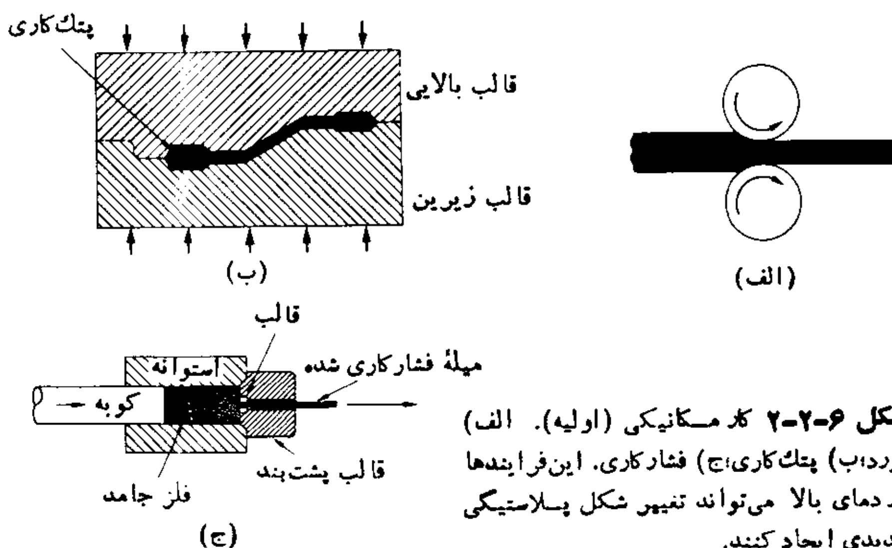


**شکل ۶-۲-۱** قطعهٔ ریختگی (قسمت بریده شده‌ای از شیر برنجی) با انجماد فلز مذاب درقالب ماسه‌ای، شکلی به‌دست آمده است که فقط به ماشینکاری اندکی نیاز دارد.

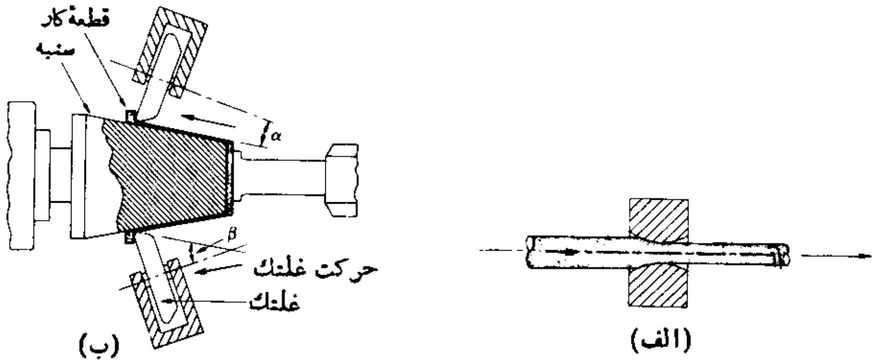
پتک‌کاری شده و غیره تبدیل مـی‌شود. در حین انجام فرایند مکانیکی، شکل تغییر می‌کند؛ بنابراین باید تنشهایی به‌کار رود که از استحکام تسلیم، که در فصل ۱ شرح داده‌شد، بیشتر بـاشد. در نتیجه، انجام فرایند روی شمش بزرگ اولیه معمولاً دردماهـای بالا صورت می‌گیرد زیرا در این‌حالت ماده به طورکلی نرمتر و انعطاف‌پذیرتر است، درآن دماهـا انرژی‌کمتری برای تغییرشکل لازم است و درحین انجام‌فرایند احتمال‌شکستن‌کمتر است. نورد، پتک‌کاری، و فشارکاری (شکل ۶-۲-۲) از انـواع متداول فرایندهـای تغییرشکل گرم‌اند.

به‌دنبال‌مراحل تغییرشکل‌اولیه، اغلب ادامهٔ فرایند در دماهای متعارفی مطلوبتر است واین‌امر امکانپذیراست زیرا اکنون ابعادآن کوچکتر ونیروها و انرژی لازم به‌همان‌نسبت کمتر است. همچنین در هزینه‌های کوره و سوخت صرفه‌جویی می‌شود. علاوه براین بیشتر فلزات در دمـای بالا سریعاً اکسید می‌شوند. در دماهـای پایین کلا از این امر اجتناب می‌شود. بالاخره در این فصل خواهیم دیدکه اگر تغییرشکل درحالتی کـه فلز در دمای معمولی است انجام شود، استحکام معمولاً افزایش مـی‌یابد. کشش سیم، دوکاری چرخشی (شکل ۶-۲-۳) و منگنه‌کاری نمونه‌هایی از فرایندهای تغییرشکل ثانویهٔ معمول‌اندکه در دمای متعارفی انجام می‌شوند.

به‌منظور درک رفتار فلزات در مراحل انجام فرایند یا بعدها درحین کار، لازم است معلومات خود را درمورد تغییرشکل کشسان ازآنچه‌که در فصل ۱ آمده است کاملترکنیم، و مکانیسم تغییرشکل پلاستیکی را درنظرگیریم. بالاخره لازم است اثرات دمـای بالا را روی مواد نشان دهیم زیرا فلز ممکن است درحین انجام فرایند در دمای بالا ویا درحین کار، ساختار (و بنابراین خواص) خود را تغییر دهد. این‌موضوعات به‌ترتیب خواهدآمد.




**شکل ۶-۲-۲** کار مـکانیکی (اولیه). الف) نورد؛ب) پتک‌کاری؛ج) فشارکاری. این‌فرایندها در دمای بالا می‌تواند تغییر شکل پـلاستیکی شدیدی ایجاد کنند.

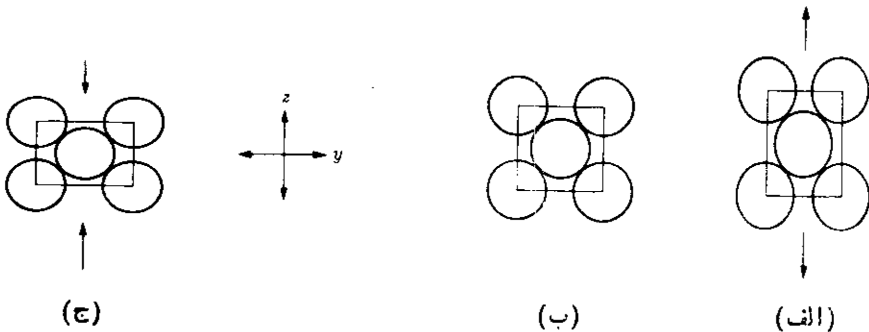



**شکل ۶-۲-۳** کـار مکانیکی (ثانویه). الف) کشش‌سیم؛ ب) ورقکاری چرخشی. بیشترفلزات وقتی دردمای متعارفی تغییرشکل می‌یابند محکمتر می‌شوند. بنابراین، این‌فرایندها درمقایسه با فرایندهای اولیهٔ شکل ۶-۲-۲، به‌محصولاتی با سطع مقطع کوچکتر اختصاص دارند.

## ۶-۳ تغییرشکل کشسان

تغییرشکل کشسان وقتی صورت می‌گیردکه تنشی روی قطعهٔ فلز، یـا بدین‌منظور روی هر مادهٔ جامد دیگر اعمال‌شود (بخش ۱-۲). وقتی بار به‌صورت کششی به‌کار مـی‌رود قطعه اندکی‌طویلترمی‌شود؛ برداشتن بار به‌نمونه اجازه‌می‌دهد که‌به‌ابعاد اولیه برگردد. برعکس وقتی‌بار به‌صورت‌فشاری اعمال می‌شود، قطعه اندکی‌کوتاهترمی‌شود. کرنش‌کشسان نتیجهٔ ازدیاد طول اندك سلول واحددرجهت بارکششی، یا انقباض اندك سلول واحد درجهت‌بار فشاری (شکل ۶-۳-۱) است.

وقتی فقط تغییرشکل کشسان صورت‌می‌گیرد، کرنش اساساً بـا تنش متناسب است این نسبت بین تنش و کرنش مدول‌کشـانی (مدول یانگ) است و از ویژگیهای نوع‌فلز




**شکل ۶-۳-۱** کرنش قائم کشسان (خیلی اغراق‌آمیز). اتمهـا از همسایه‌هـای اولیهٔ خود به‌طور دائم جدا نمی‌شوند. الف) کشش؛ ب) بدون‌کرنش؛ ج) فشار.

به‌شمار می‌رود. هرچقدر نیروهای جاذبهٔ بین اتمها درفلز بیشتر شود، مدول کشسانی بیشتر خواهد شد.

هرنوع افزایش طول یا فشردگی ساختار بلوری در جهت واحد و در اثر نیروی تك محوری، موجب تنظیم‌شدن ابعاد در زاویهٔ عمود بر نیرو می‌شود. مثلا درشکل ۶ـ۳ـ۱ (الف)، انقباض کوچکی درجهت عمود بر نیروی کششی به‌وجود می‌آید. نسبت منفی بین کرنش طولی $e_y$ و کرنش کششی مستقیم $e_z$ نسبت پواسون $\nu$ نامیده می‌شود

$$\nu = -\frac{e_y}{e_z} \qquad (۶\text{-}۳\text{-}۱)$$

مواد مهندسی را می‌توان همانندکشش (و فشار) تحت بار برشی قرارداد. در بارگذاری برشی، دونیرو موازی‌اند ولی در یك راستا نیستند [شکل ۶ـ۳ـ۲ (ب)]. در نتیجه، تنش برشی، $\tau$، برابر است با $F_s$ تقسیم برسطح تحت برش قرارگرفتهٔ $A_s$

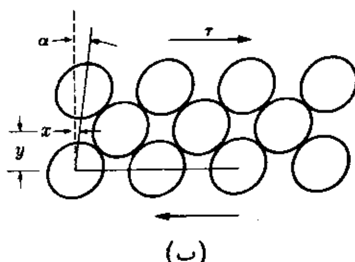
$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \qquad (۶\text{-}۳\text{-}۲)$$

تنش برشی تغییرمکان‌زاویه‌ای، $\alpha$، را به‌وجودمی‌آورد. کرنش برشی، $\gamma$، به‌صورت تانژانت آن زاویــه، یعنی $x/y$ در شکل ۶ـ۳ـ۲ (ب) تعریف مـی‌شود. کرنش قابل بازیابی یا کرنش برشی کشسان با تنش برشی متناسب است

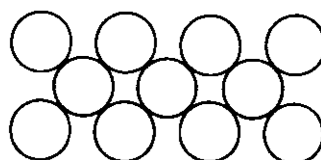
$$G = \frac{\tau}{\gamma} \qquad (۶\text{-}۳\text{-}۳)$$

که در آن $G$ مدول برشی است. مدول‌برشی که مدول صلابت نیز نامیده می‌شود با مدول کشسانی $E$ تفاوت دارد؛ ولی در تنشهای کم توسط رابطه‌ای این‌دو به‌هم مربوط می‌شوند که به‌صورت زیر نوشته می‌شود

$$E = ۲G(۱+\nu) \qquad (۶\text{-}۳\text{-}۴)$$



(ب)


(الف)

**شکل ۶ـ۳ـ۲** کرنش برشی کشسان. جفتهـای برشی، دریك صفحهٔ اتم نسبت به صفحهٔ بعدی جابه‌جایی نسبی ایجاد می‌کنند. این کرنش تا وقتی که اتمها، همسایه‌های اولیهٔ خود را حفظ می‌کنند کشسان است. الف) بدون‌کرنش؛ ب) کرنش برشی.

از آنجا که نسبت پواسون $\nu$ معمولاً بین ۲۵ر۰ و ۵ر۰ است، مقدار $G$ تقریباً ۳۵٪ از $E$ است.

مدول کشسانی سوم، مدول کشیدگی، $K$، است که عکس فشارپذیری، $\beta$، ماده و مساوی با فشار هیدروستاتیکی $P_h$ برواحد فشار حجمی، $\Delta V/V$ است

$$K = \frac{P_h V}{\Delta V} = \frac{1}{\beta} \qquad (۶-۳-۵)$$

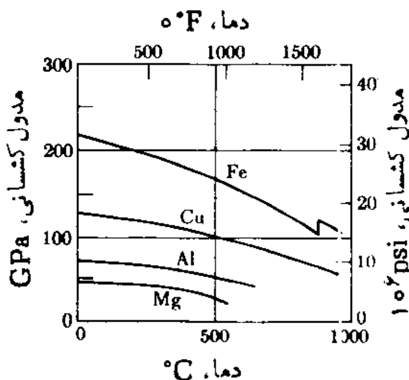
مدول کشیدگی به‌صورت زیر به‌مدول کشسانی مربوط می‌شود

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \qquad (۶-۳-۶)$$

به‌دست آوردن این رابطه در مسئلهٔ ۶-۳-۶ مطرح شده است.

**مدول کشسانی برحسب دما.** همان‌طور که درشکل ۶-۳-۳ برای چهارفلز معمولی دیده می‌شود، مدول کشسانی با افزایش دما کاهش می‌یابد. طبق شکل ۲-۵-۲ (الف)، انبساط گرمایی مقدار $dF/da$ و بنابراین مدول کشسانی را کاهش می‌دهد. ناپیوستگی درمنحنی آهن درشکل ۶-۳-۳ به‌علت تغییر از bcc به fcc در دمای ۹۱۲°C (۱۶۷۴°F) است. جای تعجب ندارد اگر بگوییم چند شکلی fcc که فشرده‌تر است، برای کرنش معین به‌تنشهای بیشتری نیاز دارد. یعنی‌مدول کشسانی برای fcc بیشتر می‌شود. همچنین ازشکل ۶-۳-۳ باید دریافت که فلزات با نقطهٔ ذوب بالا دارای مدول کشسانی بزرگترند.

**مدول کشسانی برحسب جهت بلور.** مدول کشسانی در داخل ماده ناهمسانگرد است؛ یعنی با جهت بلوری تغییر می‌کند. مثلا آهن مدول کشسانی متوسطی معادل تقریباً ۲۰۵ GPa دارد؛ ولی مدول واقعی بلور آهن از ۲۸۰ GPa درجهت [۱۱۱] تا فقط

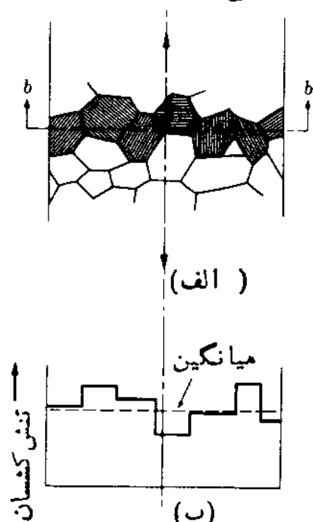



**شکل۶-۳-۳** مدول کشسانی برحسب دما.

**جدول ۶-۳-۱ مدول کشسانی (مدول یانگ)**

| فلز | بیشینه GPa | کمینه GPa | تصادفی GPa |
|---|---|---|---|
| آلومینیم | ۷۵ | ۶۰ | ۷۰ |
| طلا | ۱۱۰ | ۴۰ | ۸۰ |
| مس | ۱۹۵ | ۷۰ | ۱۱۰ |
| آهن (bcc) | ۲۸۰ | ۱۲۵ | ۲۰۵ |
| تنگستن | ۳۴۵ | ۳۴۵ | ۳۴۵ |

۱۲۵ GPa درجهت[۱۰۰] تغییرمی‌کند (جدول۶-۳-۱). نتایج‌این‌ناهمسانگردی درمواد چند بلوری اهمیت بسیار دارد. فرض‌کنیم مثلا شکل ۶-۳-۲ (الف) سطح مقطع سیمی فولادی‌را نشان‌دهد که درآن میانگین تنش ۲۰۵ MPa است. اگر دانه‌ها به‌طور تصادفی جهتگیری کنند، کرنش‌کشسان ۰٫۰۰۱ است، زیرا میانگین مدول کشسانی ۲۰۵ GPa است. ولی در حقیقت همان‌طورکه در شکل ۶-۳-۴ (ب) دیده می‌شود، تنش از ۱۲۵MPa تا ۲۸۰MPa تغییرمی‌کند، زیرا دانه‌ها جهتگیری‌مختلف‌دارند، ولی هرکدام کرنشی‌مساوی هم (۰٫۰۰۱) دارند. البته این‌به‌معنی‌آن‌است که بعضی دانه‌ها قبل‌از آنکه سایردانه‌ها به‌استحکام تسلیم‌خود برسند، از استحکام تسلیم خود می‌گذرند.




**شکل ۶-۳-۴** ناهمگنی تنش (طرحواره). تنشهای کشسان با جهتگیری دانه‌ها تغییر می‌کنند، زیرا مدول کشسانی‌آنها همسانگرد نیست.

**مثال ۶-۳-۱** روی ورق‌فولادی مربعی به‌ابعاد ۱۰۰٫۰ cm × ۱۰۰٫۰ cm کشیده شده است کـه دریك جهت (عمود براضلاع مقابل مـربع) باتنش ۲۰۰ MPa بـارگذاری می‌شود. الف) ابعاد مربع کشیده شده چقدر می‌شود؟ (نسبت پواسون فولاد = ۰٫۲۹)

بدون برداشتن تنش اولیه، تنش‌کششی ثانویه ۴۱۰ MPa با زاویه‌ای عمود بر اولی، یعنی عمود براضلاع مربع اعمال می‌شود. ب) ابعاد جدید مربع کشیده شده چقدر است؟

حل: ازآنجا کـه هیچ نوع جهتگیری ترجیحی نشان داده نشده است، مقدار مدول یانگ‌را برای دانه‌های تصادفی درنظر می گیریم (جدول ۶-۳-۱).

الف) $$e_z=\frac{۲۰۰\ \text{MPa}}{۲۰۵۰۰۰\ \text{MPa}}=۰٫۰۰۰۹۷۵$$ از رابطهٔ (۱-۲-۱)

$$e_y=-۰٫۲۹(۰٫۰۰۰۹۷۵)=-۰٫۰۰۰۲۸$$ از رابطهٔ (۶-۳-۱)

$$۱۰۰۰\ \text{mm}\,(۱+۰٫۰۰۰۹۷۵)\times ۱۰۰۰\,\text{mm}(۱-۰٫۰۰۰۲۸)$$
$$=۱۰۰۱٫۰\,\text{mm}\times ۹۹۹٫۷\ \text{mm}$$

ب) $$e_y=-۰٫۰۰۰۲۸+\frac{۴۱۰\ \text{MPa}}{۲۰۵۰۰۰\ \text{MPa}}=۰٫۰۰۱۷۲$$

$$e_z=۰٫۰۰۰۹۷۵-۰٫۲۹\left(\frac{۴۱۰}{۲۰۵۰۰۰}\right)=۰٫۰۰۰۴۰$$

$$۱۰۰۰\ \text{mm}(۱+۰٫۰۰۰۴)\times ۱۰۰۰\ \text{mm}(۱+۰٫۰۰۱۷۲)$$
$$=۱۰۰۰٫۴\ \text{mm}\times ۱۰۰۱٫۷\ \text{mm}$$

توضیح. از روابط (۱-۲-۱) و (۶-۳-۱) می‌توانیم‌رابطه‌ای کلی برای‌تغییرشکل کشسان در سه‌بعد به‌دست آوریم

$$e_x=\frac{S_x}{E}-\frac{\nu S_y}{E}-\frac{\nu S_z}{E} \tag{۶-۳-۷}$$ ▲

**مثال ۶-۳-۲** اگر آهن بـا ۱۴۰۰ MPa تحت‌فشار هیدروستاتیکی قرار گیرد، درصد تغییرحجم آن چقدر است؟ (نسبت پواسون = ۰٫۲۹)

حل: از رابطهٔ (۶-۳-۶) و با درنظر گرفتن $E_{\text{Fe}}=۲۰۵۰۰۰\ \text{MPa}$

$$K=\frac{(۲۰۵۰۰۰\ \text{MPa})}{۳(۱-۰٫۵۸)}$$
$$=۱۶۲۷۰۰\ \text{MPa}$$

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{1400\ \mathrm{MPa}}{162700\ \mathrm{MPa}} = -0.86\ \mathrm{v/o}$$

راه‌حل دیگر. از آنجا که $s_x = s_y = s_z = P_h$، رابطهٔ (۶ـ۳ـ۷) به‌صورت زیر درمی‌آید

$$e_x = \frac{(1-2\nu)(-1400\ \mathrm{MPa})}{205000\ \mathrm{MPa}}$$

$$= -0.00287 = e_y = e_z$$

$$1 + \frac{\Delta V}{V} = (1+e)^3$$

$$\frac{\Delta V}{V} = -0.86\ \mathrm{v/o}$$

توضیح. رابطهٔ (۶ـ۳ـ۶) با استفاده از حالت ویژهٔ معادلهٔ (۶ـ۳ـ۷) که در آن $s_x = s_y = s_z = P_h$ است، به‌سادگی به‌دست می‌آید. ▲

## ۶ـ۴ تغییرشکل پلاستیکی در داخل تك بلورها

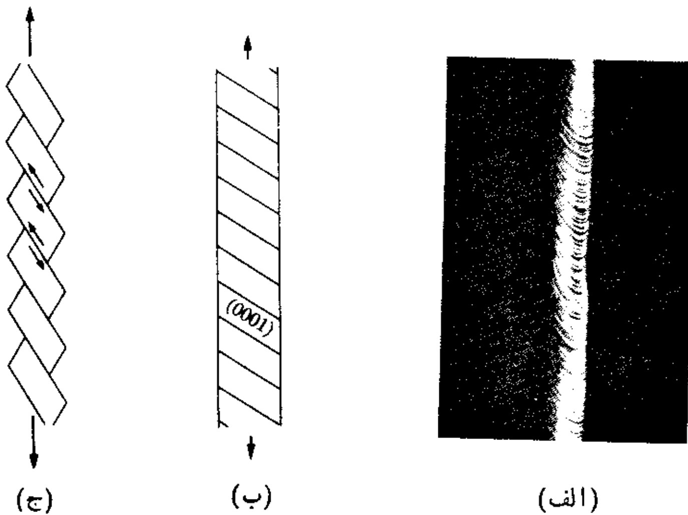
فلزات مکعبی و آلیاژهای نامنظم آنها بیشتر توسط برش‌پلاستیکی یا لغزش تغییرشکل می‌یابند که در آنها صفحه‌ای از اتمها روی صفحهٔ‌مجاور بعدی‌می‌لغزد. این یکی از روشهای تغییرشکل فلزاتی باساختار منشور شش‌بر نیز هست. حتی وقتی که تنشهای فشاری یا کششی اعمال می‌شوند، تغییرشکل برشی وجود دارد، زیرا این‌تنشها را می‌توان به‌صورت‌تنشهای برشی تفکیك کرد.

**تنش برشی بحرانی و سیستمهای لغزش.** لغزش درجهات بلوری معینی ساده‌تر از جهات دیگر صورت می‌گیرد. این‌امر درشکل ۶ـ۴ـ۱ دیده می‌شود، که در آن تك‌بلور فلز hcp به‌طور پلاستیکی تغییر شکل می‌یابد. تنش برشی لازم برای ایجاد لغزش درصفحهٔ بلوری تنش برشی بحرانی $\tau_c$ نامیده می‌شود.

می‌توانیم مجموعهٔ سیستمهای لغزش غالب در چندفلز آشنا را درجدول ۶ـ۴ـ۱ خلاصه کنیم. سیستم لغزش شامل صفحهٔ لغزش $(hkl)$*، و جهت‌لغزش $[uvw]$ است. به‌علت وجود صفحه‌های چندتایی در مجموعهٔ صفحه‌ها، و جهتهای چندتایی در مجموعهٔ جهتها، سیستمهای لغزش مختلفی وجود دارند (بخشهای ۳ـ۶ و ۳ـ۷)، در جدول ۶ـ۴ـ۱ این دوامر مشخص است:

---

* دربخش ۳ـ۷، شاخص $(hkil)$ بلورهای منشوری شش‌بر را ببینید.




**شکل ۶-۴-۱** لغزش در تک‌بلور (hcp). لغزش به‌موازات صفحهٔ (۰۰۰۱)*، که کوچکترین بردار لغزش‌را دارد.

**جدول ۶-۴-۱** سیستمهای لغزش غالب درفلزات

| ساختار | مثال | صفحات لغزش | جهات لغزش | تعداد سیستمهای لغزش مستقل |
|---|---|---|---|---|
| bcc | α-Fe,Mo,Na,W | {۱۰۱} | ⟨$\bar{۱}$۱۱⟩ | ۱۲ |
| bcc | α-Fe,Mo,Na,W | {۲۱۱} | ⟨$\bar{۱}$۱۱⟩ | ۱۲ |
| fcc | Ag,Al,Cu, γ-Fe,Ni,Pb | {۱۱۱} | ⟨۱۱۰⟩ | ۱۲ |
| hcp | Cd,Mg,α-Ti,Zn | {۰۰۰۱}* | ⟨۱۱$\bar{۲}$۰⟩ | ۳ |
| hcp | α-Ti | {۱۰$\bar{۱}$۰}* | ⟨۱۱$\bar{۲}$۰⟩ | ۳ |

**۱. جهت لغزش در هربلور فلزی جهتی‌است با بیشترین چگالی خطی درنقاط‌معادل، یاکوتاهترین فاصلهٔ بین نقاط معادل.**

**۲. صفحه‌های لغزش صفحه‌هایی‌اند که فضای بین‌آنها وسیع است (بخش ۳-۸) و بنابراین چگالی صفحه‌ای آن بالاست (بخش ۳-۷).**

* در بخش ۳-۷، شاخص (*hkil*) بلورهای منشوری شش بر را پیدا کنید.

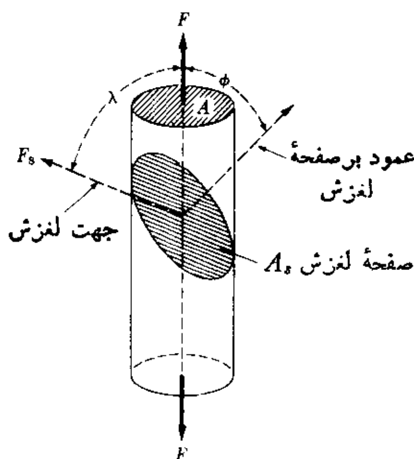
**تنشهای برشی تفکیك شده.** تنش محوری (کششی یا فشاری) کـه برای ایجاد تغییر شکل پلاستیکی لازم است، نه‌تنها برای سیستم لغزش هرماده به‌تنش برشی بحرانی بستگی دارد بلکه به‌جهتگیری تنش به‌کار رفته‌نسبت به‌سیستم لغزش نیزمربوط می‌شود (شکل ۶ـ۴ـ۲). در درجهٔ اول، سطح برشی $A_s$، برابر سطح مقطع، $A$، عمود بر نیروهای کششی یا فشاری نخواهد شد. در درجهٔدوم نیروهاباید از نیروی $F$ درجهت محوری به‌نیروی $F_s$ درجهت برشی تفکیك شود. باچرخش صفحه و دورشدن آن ازمحورتنش اعمال شده، سطح افزایش می‌یابد؛ بنابراین $A_s = A/\cos\phi$، که درآن $\phi$ زاویهٔ بین جهت محوری وعمود برصفحهٔ لغزش (شکل ۶ـ۴ـ۲) است. نیروی تفکیك‌شده برابراست با $F_s = F\cos\lambda$، که درآن $\lambda$ زاویهٔ بین جهتهای دونیروست. ازآنجاکه‌تنش برشی، $\tau$، با نیروی برشی، $F_s$، برواحد سطح برش، $A_s$، برابراست

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} = \frac{(F\cos\lambda)}{(A\cos\phi)} = s\cos\lambda\cos\phi \qquad (۶\text{ـ}۴\text{ـ}۱)$$

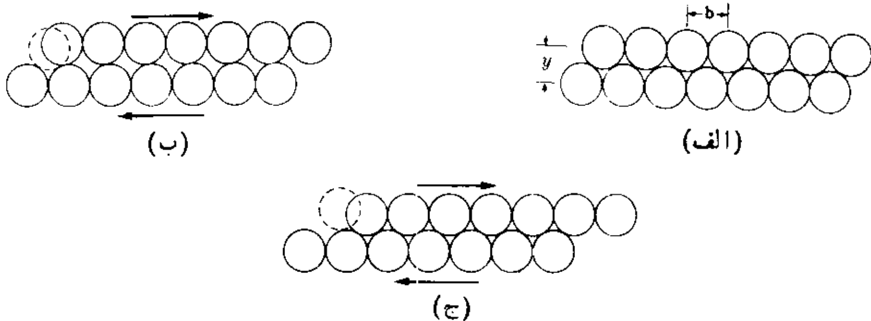
این قانون اشمید است که تنش برشی تفکیك شده، $\tau$، را به‌تنش محوری، $s$، $(=F/A)$ مربوط می‌کند.

وقتی $\lambda$ و $\phi$ هردو $۴۵^\circ$ باشند، لغزش باکمینه نیروی‌محوری صورت‌می‌گیرد. تحت این شرایط $\tau$ برابراست بایك‌دوم تنش محوری $F/A$. تنش برشی‌تفکیك شده در هرنوع جهتگیری بلوری دیگر از تنش محوری کمتراست. این‌تنش بانزدیك‌شدن $\lambda$ یا $\phi$ به $۹۰^\circ$، به‌صفر نزدیك می‌شود.

**مکانیسم لغزش.** شکل ۶ـ۴ـ۳ مکانیسم‌سادهٔ لغزش را نشان می‌دهد. اگر بخواهیم‌استحکام فلزات را براین اساس محاسبه‌کنیم، نتیجه نشان خواهد دادکه استحکام فلزات باید تقریباً




**شکل ۶ـ۴ـ۲** تنشهـای تفکیك شـده. تنش محوری $\sigma$ برابـراست بـا $F/A$. تنش بـرشی تفکیك شده $\tau$ برابر است بـا $F_s/A_s$ که درآن $F_s = F\cos\phi$، و $A_s = A/\cos\phi$ کـه از آن رابطهٔ (۶ـ۴ـ۱) به‌دست می‌آید.

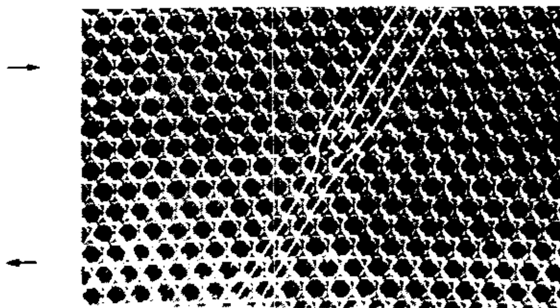



**شکل ۶-۴-۳** مکانیسم فرضی لغزش (ساده شده)، در واقع فلزات با تنش برشی کمتر آنچه که این مکانیسم نیاز دارد، تغییر شکل می‌یابند.

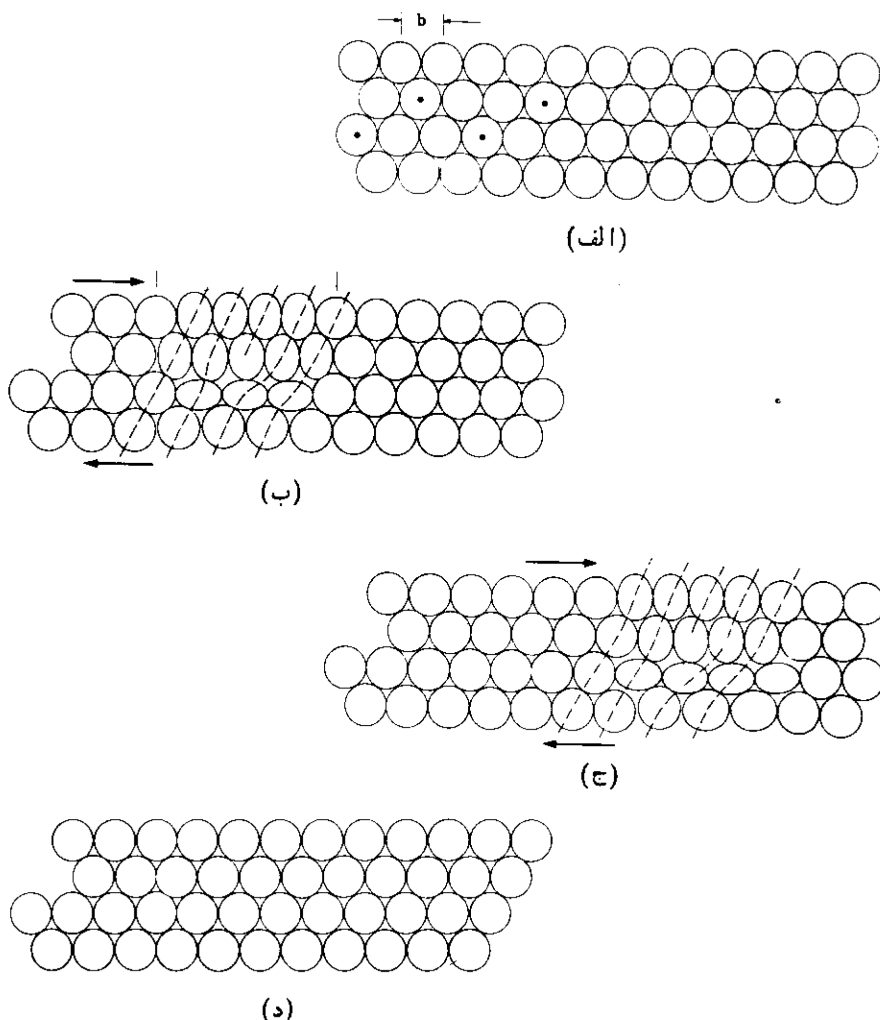
$G/۶$ باشد که درآن $G$ مدول برشی است. از آنجاکه فلزات تا این حد محکم نیستند، مکانیسم لغزش متفاوتی باید عملی شود. تمام نتایج تجربی برمکانیسمی دلالت دارندکه در آن حرکتهای نابجاییها مؤثرند. اگر ازشکل ۶-۲-۴ به‌عنوان الگوی نابجایی استفاده کنیم و تنش برشی را در راستای افقی قرار دهیم، نابجایی (شکل ۶-۴-۵) می‌تواند باتغییرمکان برشی در داخل بلور حرکت کند. (شکل ۴-۴-۵ را نیز ببینید.) تنش برشی لازم برای این نوع تغییر شکل، کسر کوچکی از مقدارقبلی $G/۶$ است و با استحکام برشی مشاهده‌شده جور است.

☐ مکانیسم لغزش مستلزم رشد و حرکت خط نابجایی است. انرژی، $E$، خط نابجایی باطول خط نابجایی، $l$، حاصل‌ضرب مدول برشی، $G$، و مربع بردار واحد لغزش، $b$، متناسب است (بخش ۴-۴)

$$E \propto lGb^{2} \qquad (۶-۴-۲)$$



**شکل ۶-۴-۴** نابجایی لبه‌ای. الگویی از عیب ساختار بلوری به‌شکل حبابهای ردیف شده. به‌ردیف اضافی آنها دقت کنید.




**شکل ۶-۴-۵** لغزش توسط نابجایی. دراین الگو فقط تعدادکمی ازاتمها دریک‌زمان ازموقعیت کم‌انرژی خود حرکت می‌کنند. بنابراین درمقایسه با وقتی‌که اتمها باهم به شکلی که درشکل ۶-۴-۳ پیشنهاد شده حرکت می‌کنند، برای ایجاد لغزش تنش‌کمتری نیاز است.

این خودبه‌خود به‌معنی آن است‌که ساده‌ترین نابجاییها برای ایجاد و گسترش تغییرشکل پلاستیکی، آنهایی‌اند که کوتاهترین بردار واحد لغزش، **b**، را دارند. (شکل ۴-۲-۳)، به‌ویژه ازآن جهت‌که **b** به‌صورت‌مربع‌است. جهتهای لغزش در فلزی با کوتاهترین بردار لغزش، جهتهایی‌اند که چگالی خطی اتمها درآنها بیشتراز همه‌است. کمترین مقدار مدول برشی، $G$، به‌صفحه‌هایی که بیشترین فاصله‌را دارندمربوط‌است و بنابراین‌چگالی‌صفحه‌ای

اتمهای آنها ازهمه بیشتراست. از این‌رو می‌توان این قاعدهٔ سرانگشتی را مطرح کرد که در آن کمترین تنشهای برشی بحرانی روی صفحه‌هایی با بیشترین چگالی و درجهتهایی با بیشترین چگالی پیش‌بینی می‌شود.*

**حرکتهای نابجایی در محلول جامد.** نابجایی لبه‌ای چه به‌صورت (ب) و چه به‌صورت (ج) درشکل ۶-۴-۵ باشد، انرژی مربوط به آن (شکل ۴-۴-۳) یکسان است. بنابراین برای حرکت بین این دوحالت به‌انرژی نیازی نیست.** ولی وقتی اتمهای جسم حل‌شدنی وجود داشته‌باشند چنین نیست. مطابق شکل ۶-۴-۶، زمانی که اتم ناخالصی وجود داشته باشد، انرژی مربوط به‌نابجایی کمتر از انرژی درفلز خالص است. بنابراین وقتی نابجایی به‌اتمهای خارجی برخورد می‌کند، از حرکت آن جلوگیری می‌شود زیرا برای خلاصی آن ولغزش بیشتر، باید انرژی صرف شود. در نتیجه فلزاتی که به‌صورت محلول جامدند معمولا نسبت به‌فلزات خالص استحکام بیشتری دارند (شکلهای ۶-۱-۲ و ۶-۱-۳). این عمل را سخت‌کردن محلولی می‌نامند.

□ **ترکیبات بین فلزی.** فازهایی مثل $Al_5Mg_3$، $Cu_2Al$، $CuAl_2$، و برنج $\beta'$ (CuZn) در قسمتهای مختلف این‌متن ذکر می‌شوند. این فازها درمقابل برش مقاوم‌اند، همان‌طور که‌درمورد سرامیکها (فصل۸) یا درمورد‌هر ترکیب سه‌بعدی که حاوی‌همسایگانی از اتمهای غیرمشابه است چنین است، زیرا لغزش، نظم ترجیحی بین اتمهای غیرمشابه را بهم می‌زند (شکل ۴-۲-۲). بنابراین اینها سخت وانعطاف‌ناپذیر و درنتیجه‌تردند.

این فازهای سخت خود به‌سادگی قابل‌استفاده نیستند؛ ولی وقتی به‌صورت ذرات خیلی‌ریز در آلیاژهای نرم موجود باشند به‌فلزات استحکام می‌دهند (فصل ۱۱).

**مثال ۶-۴-۱** برای داشتن نیروی تفکیک شدهٔ ۱۳۰ N درجهت [۱۰۰] بلور مکعبی، چه نیرویی درجهت [$1\bar{1}0$] لازم است؟

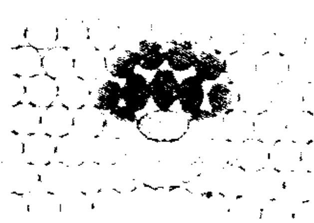
حل:

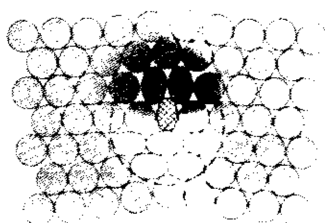
$$\frac{F_{(100)}}{F_{(1\bar{1}0)}} = \cos[1\bar{1}0] \measuredangle [100]$$

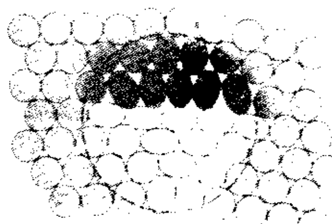
---

* کلا استثناهای آشکاری در این قاعده وجود دارد زیرا صفحه‌ها و یا جهتهای لغزش آسان برای دریافت تنش برشی تفکیک شده، جهتگیری کرده‌اند. مثلا اگر نیرویی درجهت [۰۱۱] یك‌فلز bcc اعمال شود در [$1\bar{1}1$] ($\bar{1}01$) نمی‌تواند لغزشی صورت‌گیرد، زیرا $\cos\phi = 0$ است. ولی، احتمال‌لغزش درسیستم [$\bar{1}11$] (۲۱۱) وجود دارد زیرا $\cos\phi$ و $\cos\lambda$ به‌ترتیب برابرند با $1/\sqrt{3}$ و $\sqrt{2/3}$؛ و بنابراین $\tau = 0{,}47\,(F/A)$.

** این دردوحالت صحیح نیست. (۱) درصورتی‌که حرکت منجر به‌افزایش‌طول‌نابجایی‌شود، یا (۲) تجمع نابجایی وجود داشته باشد (شکل ۶-۷-۶).


(الف) اتم ناخالصی بزرگتر


(ب) اتم ناخالصی کوچکتر


(ج) فلز خالص

**شکل ۶-۴-۶** محلول‌جامد و نابجاییها. اتمی با اندازهٔ ناهماهنگ، تنش اطراف نابجایی‌را کاهش می‌دهد. درنتیجه برای جداکردن نابجایی از اتم جسم حل‌شده، باید انرژی صرف‌شود وتنش‌اضافی‌اعمال‌شودواین‌عامل‌اصلی سخت‌کردن محلولی است.

$$F_{(1\bar{1}0)} = \frac{۱۳۰\ \mathrm{N}}{\cos ۴۵^\circ}$$

$$= ۱۸۴\ \mathrm{N}$$ ▲

**مثال ۶-۴-۲** تنش برشی بحرانی $\tau_c$ برای سیستم لغزش $\{۱۱۱\}\langle \bar{۱}۱۰\rangle$ مس خالص ۱ MPa است. الف) چه‌تنشی درجهت [۰۰۱] باید اعمال‌شود تا درجهت[۱۰۱]و روی صفحهٔ $(\bar{۱}۱۱)$ لغزش ایجاد کند؟ ب) درجهت [۱۱۰] و روی صفحهٔ (۱۱۱) چطور؟

حل: ازشکل ۳-۷-۳ (ج)

الف)
$$\cos\phi = \frac{\text{ضلع سلول واحد}}{\text{قطر سلول واحد}} = \frac{a}{a\sqrt{۳}} = ۰{,}۵۷۷$$

$$\cos\lambda = \frac{\text{ضلع سلول واحد}}{\text{قطر وجه‌سلول واحد}} = \frac{a}{a\sqrt{۲}} = ۰{,}۷۰۷$$

$$s = \frac{F}{A} = \frac{۱\ \mathrm{MPa}}{(۰{,}۵۷۷)(۰{,}۷۰۷)} = ۲{,}۴۵\ \mathrm{MPa}$$

ب) ازآنجاکه $\lambda = ۹۰^\circ$ است، بنابراین $\cos\lambda = ۰$ و $s = \infty$ (وقتی‌تنش‌درجهت [۰۰۱] اعمال می‌شود، دراین جهت لغزش نمی‌تواند صورت گیرد.)

توضیح. دراینجا ضرب داخلی می‌تواند به‌کار رود ولی فقط برای بلورهای مکعبی استفاده می‌شود. ▲

□ **مثال ۶-۴-۳** ۱۲ سیستم لغزش موجود در سیستمهای لغزش $\{111\}\langle\bar{1}10\rangle$ فلزات fcc را باشکل نشان دهید.

حل: شکل ۶-۴-۷ را ببینید. هریك از چهارصفحهٔ مجموعه $\{111\}$ سه جهت لغزش دارد. بنابراین داریم

$$[110](\bar{1}11) \quad [110](1\bar{1}1) \quad [1\bar{1}0](11\bar{1}) \quad [\bar{1}10](1\bar{1}1)$$

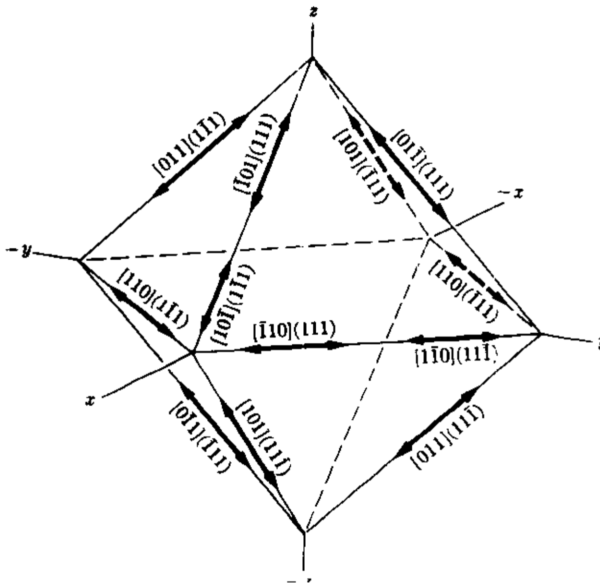
$$[101](\bar{1}11) \quad [10\bar{1}](1\bar{1}1) \quad [101](11\bar{1}) \quad [10\bar{1}](111)$$

$$[01\bar{1}](\bar{1}11) \quad [011](1\bar{1}1) \quad [011](11\bar{1}) \quad [0\bar{1}1](111)$$

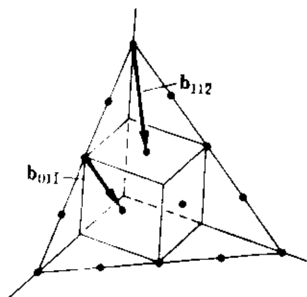
توضیح. صفحات عقب موازی صفحات جلویی‌اند و بنابراین همان سیستمهای لغزش را دارند. مثلا $(\bar{1}\bar{1}1)[110]$ همان سیستم لغزش $(11\bar{1})[110]$ است. ▲

□ **مثال ۶-۴-۴** هردو جهت $[0\bar{1}1]$ و $[11\bar{2}]$ درصفحهٔ $(111)$ آلومینیم fcc قرار می‌گیرند. بنابراین هردو لغزش $(111)[0\bar{1}1]$ و $(111)[11\bar{2}]$ را درنظر می‌گیریم. الف) شکلی ازصفحهٔ $(111)$ بکشید و بردارهای واحد لغزش $[0\bar{1}1]$ و $[11\bar{2}]$ را نشان دهید؛ ب) انرژی خطوط نابجایی حاوی این‌دو بردار تغییر مکان را باهم مقایسه کنید.

حل: الف) شکل را ببینید (شکل ۶-۴-۸).




**شکل ۶-۴-۷** ۱۲ سیستم لغزش مربوط به $\{111\}\langle 1\bar{1}0\rangle$. (مثال ۶-۴-۳ را ببینید.)




**شکل ۶-۴-۸** مثال ۶-۴-۴ را ببینید.

ب) با درنظر گرفتن رابطهٔ (۶-۴-۲)

$$\frac{E_{011}}{E_{112}}=\frac{lG\mathbf{b}^2_{011}}{lG\mathbf{b}^2_{112}}$$

هردو دارای صفحهٔ لغزش (۱۱۱) هستند؛ بنابراین مدول برشی مشابهی به‌کار می‌رود. براساس واحد طول $l$

$$\frac{E_{011}}{E_{112}}=\left(\frac{\mathbf{b}_{011}}{\mathbf{b}_{112}}\right)^2$$

$$=\left[\frac{(a/\sqrt{2})}{(a\sqrt{6}/2)}\right]^2=\frac{1}{3}$$

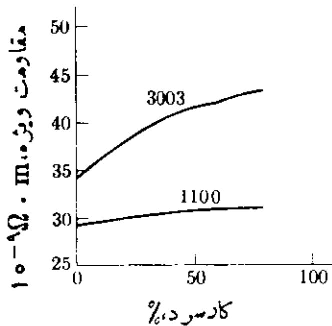
$$E_{011}=\frac{1}{3}E_{112}$$

توضیح. با این نسبت ۱/۳، بین این‌دو سیستم لغزش بالقوه برای فلزات fcc، لغزش با اولی بسیار ساده‌تر صورت می‌گیرد. ▲

## ۶-۵ خواص فلزاتی که تغییرشکل پلاستیکی یافته‌اند

تغییر شکل پلاستیکی ساختار داخلی فلز را تغییر می‌دهد؛ بنابراین انتظار می‌رود که تغییر شکل، خواص‌فلز را نیز تغییردهد. این تغییر خاصیت رامی‌توان با اندازه‌گیری حساسیت ثابت کرد. ساختار اعوجاج یافته، میانگین مسیر آزاد حرکت الکترونها را کاهش می‌دهد (بخش ۵-۲) و بنابراین مقاومت بالا می‌رود (شکل ۶-۵-۱).

دومین تغییری که درخواص به‌وجود می‌آید و ازنظر مهندسی اهمیت خیلی بیشتری دارد، استحکام است. فلزاتی که به‌طورپلاستیکی تغییرشکل یافته‌اند همان‌طور که درفصل ۱ دیدیم‌قویتر می‌شوند. ازآنجا منحنی $s/e$ شکل ۱-۲-۱(ج) با بیشترشدن استحکام‌تسلیم، به‌طور مداوم بالا می‌رود.




شکل ۶-۵-۹ مقاومت ویژهٔ الکتریکی برحسب کارسرد (آلیاژهای کارشدهٔ آلومینیم)؛ $1100 = 99/9Al$؛ $3003 = \%1/2Mn$، بقیه Al (برای تعریف کارسرد رابطهٔ (۶-۵-۱) را ببینید).

در شکل ۶-۵-۱ مثل سایر حالات، بهتر است درصد کار سرد را به‌عنوان شاخص تغییرشکل پلاستیکی درنظربگیریم. کار سرد، مقدارکرنش پلاستیکی به‌وجودآمده درحین انجام فرایند است که توسط درصد کاهش سطح مقطع حاصل از تغییرشکل نوشته می‌شود؛ یعنی

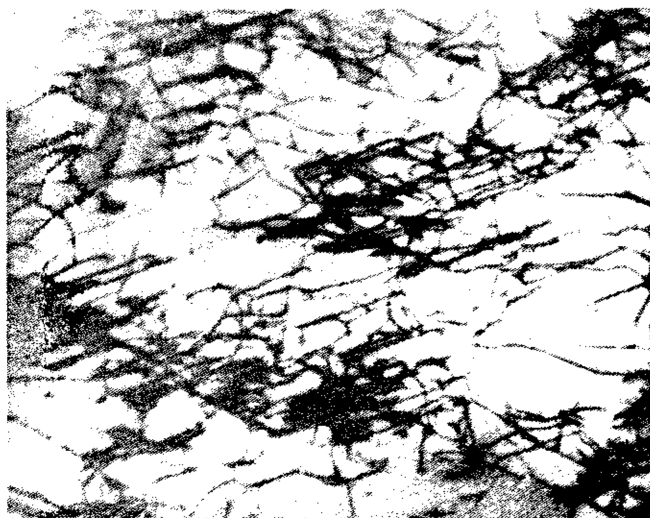
$$\%CW = \left[\frac{A_0 - A_f}{A_0}\right]100 \qquad (۶-۵-۱)$$

که در آن $A_0$ و $A_f$ به‌ترتیب سطوح اولیه ونهایی است.

کرنش سختی. مس موجود درشکل ۶-۵-۲ تغییرشکل پلاستیکی یافته است. تغییرشکل به‌صورت آثار صفحات لغزش درسطحی که قبلا پرداخت شده، جلوه‌گر می‌شود. اثر تغییر شکل پلاستیکی درمیکروسکوپ الکترونی نیز قابل‌مشاهده است. شکل ۶-۵-۳ نشاندهندهٔ نابجاییها در فولاد زنگ‌نزنی‌است که‌روی آن شدیداً کارسرد انجام شده است. تغییرمسیر خطها نشاندهندهٔ نابجاییهاست؛ تعداد و طول آنها با انجام کارسرد اضافی افزایش بسیار می‌یابد. طبق‌شکل ۶-۵-۴، طول کلی خطهای نابجایی آثار قابل‌ملاحظه‌ای روی تنش



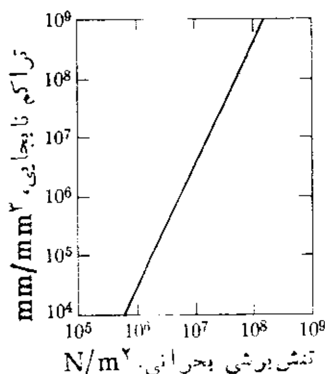
شکل ۶-۵-۲ مس چند بلوری که تغییر شکل پلاستیکی یافته است (۲۵×). آثار صفحه‌های لغزش در سطح پرداخت شدهٔ فلز آشکار است.



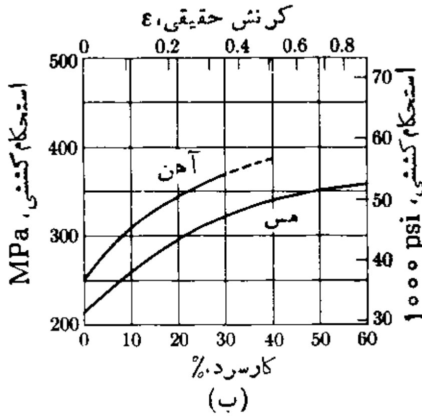
**شکل ۶-۵-۳** نابجایی در فلزاتی که تغییرشکل پلاستیکی یافته‌اند (فولاد زنگ‌نزن، ۳۰۰۰۰×) تغییرشکل اضافی، نابجاییهای بیشتری به‌وجود می‌آورد. همچنین افزایش نابجاییها، مانع از تغییرشکل بیشتر می‌شود. نتیجهٔ آن کرنش سختی است.

برشی دارد. نتیجه می گیریم که اگر چه نابجاییها علت اصلی تغییرشکل پلاستیکی‌اند (شکل ۶-۴-۵)، ولی مانع حرکت سایر نابجاییها مـی‌شوند. گیرکردن نابجاییها یا «فشردگی ترافیک»، تنش برشی بحرانی، $\tau_c$، و بنابراین استحکام مواد را افزایش می‌دهد.

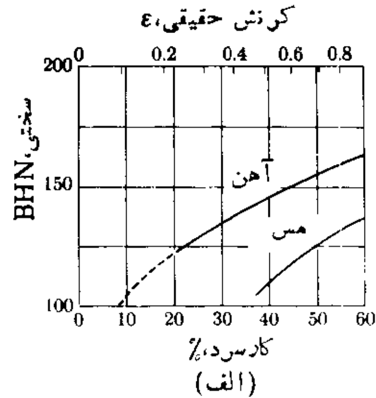
داده‌های مربوط به‌نوع ارائه‌شده درشکـل ۶-۵-۴ به‌صورت اطلاعـات مهندسی عملیتر درشکلهای ۶-۵-۵، ۶-۵-۶ و ۶-۵-۷ دیده می‌شود.



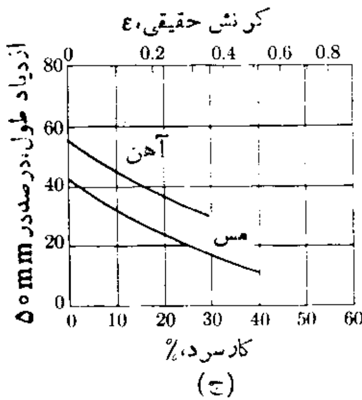

**شکل ۶-۵-۴** چگالی نابجایی برحسب تنش برشی بحرانی. افزایش تعدادنابجاییهامانعی در راه حرکت نابجایی به‌وجود می‌آورد.



(ب)



(الف)



(ج)

**شکل ۶ـ۵ـ۵** کارسرد برحسب خواص مکانیکی (آهن و مس). کار سرد، مقدار کرنش پلاستیکی است که با کاهش سطح مقطع نشان داده می‌شود (رابطهٔ ۶ـ۵ـ۱).

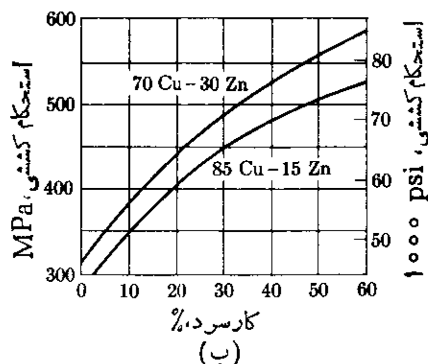
افزایش سختی که از تغییرشکل پلاستیکی به‌وجود می‌آید کرنش سختی نامیده‌می‌شود. آزمایشهای انجام شده نشان می‌دهند که این افزایش سختی بـا افزایش استحکام کششی و استحکام تسلیم همراه است. از طرف دیگر کرنش‌سختی انعطاف‌پذیری را کـم می‌کند، زیرا قسمتی از تغییرشکل درحین‌کارسرد و قبل‌از آنکه علائم سنجه (شکل ۱ـ۲ـ۲) روی میلهٔ آزمایش قرارداده شود، به‌وجود می‌آید. پس درحین آزمایش. انعطاف‌پذیری کمتری مشاهــده می‌شود. فرایند کرنش‌سختی، استحکام تسلیم را بیشتراز استحکام‌کششی افـزایش می‌دهد (شکل ۶ـ۵ـ۷)، و با افزایش‌مقدار کارسرد، هردو به‌استحکام‌شکست نزدیک‌می‌شوند.

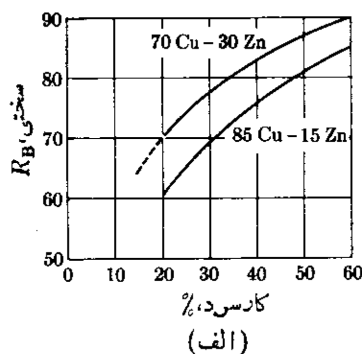
**مثال ۶ـ۵ـ۱** سیم آهنی تـابکاری شده‌ای ابتدا ۱٫۲۳ میلی‌متر قطر دارد. این سیم بـا کشیده‌شدن از میان قـالبی کـه قطرسوراخ آن ۱٫۰۴ میلی‌متر است، سردکاری می‌شود. الف) انعطاف‌پذیری سیم قبل ازکشیدن چقدر است؟ ب) بعد ازکشیدن چطور؟

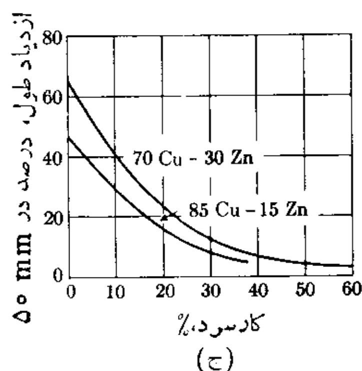
**حل: الف) ازشکل ۶ـ۵ـ۵ (ج)**

۵۵٪ ازدیادطول (۵۰ میلی‌متر)

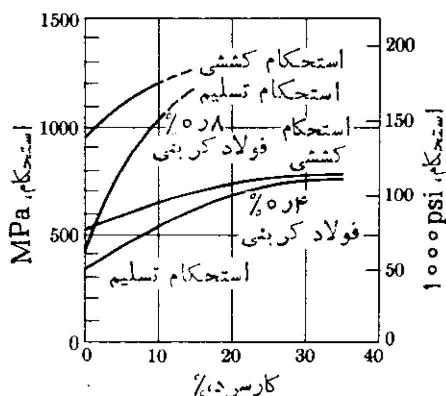
ب) (۵ر۲۸٪یا) ۲۸۵ر۰ = $\frac{(\pi/4)(1.23)^2-(\pi/4)(1.04)^2}{(\pi/4)(1.23)^2}$ = کارسرد




**شکل ۶-۵-۶** کارسرد برحسب خواص مکانیکی (برنج).




**شکل ۶-۵-۷** کارسرد برحسب استحکام فولادهای پرکربن.

ازشکل ۶ــ۵ــ۵ (ج)

۳۰٪ازدیاد طول (۵۰ میلی‌متر)

توضیح. معمولا مقدار محدودی برون‌یابی مجاز است. همچنین می‌توان بین منحنیها درون‌یابی کرد و بدین‌وسیله داده‌های مربوط به‌سایر آلیاژهـا را به‌دست آورد؛ مثلا اگر شکلهای ۶ــ۵ــ۶ و ۶ــ۵ــ۵ بـا هم به‌کار گرفته شوند برای ۸۰ Cu–۲۰ Zn در شکل ۶ــ۵ــ۶ یا برای ۹۰ Cu–۱۰ Zn می‌توان این داده‌ها را به‌دست آورد. ▲

**مثال ۶ــ۵ــ۲** مس یـا بـرنج سردکـاری شده را مـی‌توان در مـواردی بـامشخصـات $S_t \geqslant$ ۳۴۵ MPa وانعطاف‌پذیری بیشتراز ۲۰٪ ازدیاد طول در ۵۰ میلی‌متر به‌کاربرد یك فلز را انتخاب کنید.

حل: داده‌های سردکاری، مشخصات‌زیر را نشان می‌دهند

| | مس | برنج (۸۵–۱۵) | برنج (۷۰–۳۰) |
|---|---|---|---|
| شکل | ۶ــ۵ــ۵ | ۶ــ۵ــ۶ | ۶ــ۵ــ۶ |
| استحکام کششی | ⩾٪۴۰CW | ⩾٪۹CW | ⩾٪۴CW |
| انعطاف‌پذیری (درصدازدیادطول) | ⩽٪۲۴CW | ⩽٪۱۶CW | ⩽٪۲۳CW |
| گستره | — | ٪۹–٪۱۶CW | ٪۴–٪۲۳CW |

توضیح. در این‌حالت برنج انتخاب می‌شود. اگر سایر عوامل مشابه باشد، برنجی که روی بیشتری دارد (۷۰ Cu–۳۰ Zn) برگزیده مـی‌شود. زیرا روی از مس ارزانتر است. عـلاوه براین گسترهٔ ۲۳CW٪–۴٪ در حین انجام فرایند روی فلز، انعطاف‌پذیری بیشتری نشان می‌دهد. در اینجا CW علامت اختصاری کار سرد است. ▲

## ۶ــ۶ تبلور مجدد

تبلور مجدد فرایند رشد بلورهای جدید از بلورهایی است که قبلا تغییرشکل یافته‌اند.

بلورهایی که تغییرشکل پلاستیکی یافته‌اند، مثل آنهایی کـه درشکلهای ۶ــ۵ــ۲ و ۶ــ۵ــ۳ دیده می‌شوند، نسبت به‌بلورهای بدون کرنش، انرژی بیشتری دارند زیرا دارای نابجاییها و عیوب نقطه‌ای‌اند. درصورتی که موقعیتی پیدا شود اتمها برای به‌وجودآوردن آرایهٔ کاملتر و بدون کرنش تغییرمکان می‌دهند. چنین‌فرصتی وقتی به‌دست می‌آید که بلورها

توسط فرایندی به‌نام تابکاری در دمای بالا قرار گیرند. نوسانات گرمایی شبکه در دماهای بالاموجب نوآرایی اتمهاوایجاد دانه‌هایی بااعوجاج کمترمی‌شود. شکل ۶ـ۶ـ۱ پیشرفت این تبلور مجدد را نشان می‌دهد.

در قطعه‌ای برنجی که ۳۳٪ سردکاری شده کرنش‌سختی به‌وجود آمده است [شکل ۶ـ۶ـ۱ (الف)]. چندین نمونه از آن تا $580\ ^\circ C$ $(1076\ ^\circ F)$ به‌مدت چندثانیه گرم شده‌اند. دانه‌های جدید، یعنی بلورهای جدید برنج fcc ، در نمونه‌ای که فقط به‌مدت ۳ ثانیه گرم‌شده‌است دیده‌می‌شود [شکل ۶ـ۶ـ۱(ب)]. تبلور مجددابتدا درطول نوارهای صفحه‌های لغزش قبلی آغاز می‌شود. در مدت ۴ ثانیه، تقریباً عمل تبلور مجدد به‌نیمه می‌رسد [شکل ۶ـ۶ـ۱ (ج)]، و در ۸ ثانیه برنج به‌طور کامل تبلور مجدد می‌یابد [شکل ۶ـ۶ـ۱ (د)]. اگر بلورهای تازه‌شکل آخری را با میکروسکوپ‌الکترونی بررسی کنیم، درمی‌یابیم که‌کاهش بسیاری در تعداد نابجاییها به‌وجود آمده است، همچنین سختی به‌طور قابل‌توجهی‌افت کرده و از مقدار اولیهٔ ۱۶۵ BHN به‌کمتر از ۱۰۰ BHN رسیده است.

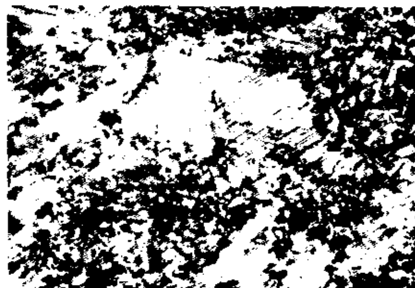
**دماهای تبلور مجدد.** فرایندتبلورمجدد به‌حرکت ونوآرایی اتمی‌نیاز دارد. این‌نوآرایی برای تبلور مجدد در دماهای بالا آسانتر صورت می‌گیرد. درحقیقت در شکل ۶ـ۶ـ۲



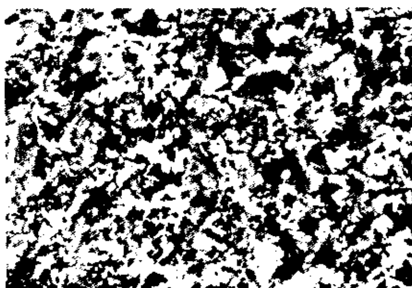
(الف) ۳۳٪ سردکاری



(ب) ۳ ثانیه در $580\ ^\circ C$ $(1076\ ^\circ F)$

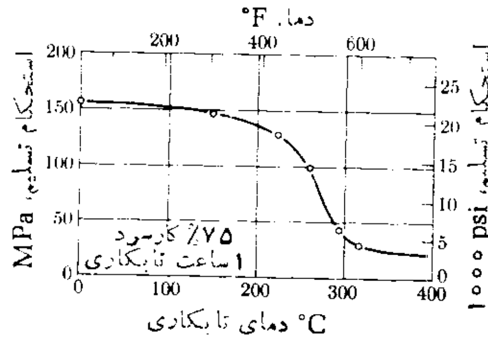


(ج) ۴ ثانیه در $580\ ^\circ C$



(د) ۸ ثانیه در $580\ ^\circ C$

**شکل ۶ـ۶ـ۱** تبلور مجدد برنج کرنش سختی‌شده ( $\times 40$ ).

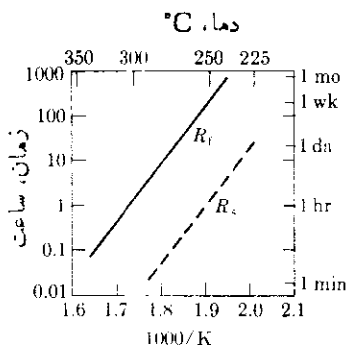



**شکل ۶-۶-۲** استحکام تسلیم برحسب تبلور مجدد (آلومینیم). ابتدا ۷۵٪ سردکاری شده است، فلز بهمدت یك‌ساعت تا دمـای ذکرشده مجدداً گرم شده است. این‌مدت برای تبلور مجدد فلز در °C ۳۰۰ و بالاتر کافی است. استحکام تسلیم‌کاهش می‌یابد و کرنش‌سختی با ایجاد دانه‌های جدید از بین می‌رود.

می‌بینیم که وقتی نمونه‌ای به‌مدت یك‌ساعت در °C ۳۰۰ (°F ۵۷۰) نگه داشته مـی‌شود کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در استحکام آن به‌وجود می‌آید. اگر در آغاز ۷۵٪ سردکاری شده باشد، این‌نمونه دراین‌مدت تقریبا به‌طورکامل تبلورمجدد یافته است. درعوض نمونه‌هایی که به‌مدت یك ساعت در دماهای زیر °C ۲۰۰ (°F ۴۰۰ ~) نگه داشته می‌شوند تقریباً تمام استحکام بالای خـود را کـه درحین ۷۵٪ سردکاری به‌دست‌آورده‌اند حفظ می‌کنند. بنابراین دمای تبلور مجدد، $T_R$، به دمایی گفته می‌شود که در آن میکروساختار و استحکام شدیداً تغییر کنند. در این‌مورد $T_R$ تقریباً °C ۲۷۰ است.*

دمای تبلورمجدد توسط چندین‌عامل تعیین می‌شود. رقم مطلوب آن است که $T_R$ بین سه‌دهم و شش‌دهـم دمای مطلق ذوب، K، یعنی $T_m$ ۰٫۳ تا $T_m$ ۰٫۶ بـاشد. اساس این عمومیت آن است کـه نفوذپذیری $D$ برای خود نفوذی مستقیماً به‌دمـای ذوب‌فلز بستگی

* در دماهای کمی‌پایینتر از دمای‌تبلورمجدد، کاهش اندکی‌در استحکام و بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در رسانندگی الکتریکی به‌وجود می‌آیدکـه بازیابی نامیده می‌شود. علت ایجاد این تغییرات در دمای پایینترآن است که در داخل بلورهایی‌کـه درآنها کرنش به‌وجود آمده است عیوب نقطه‌ای (تهیجایها، اتمهای‌بین‌نشین و... کـه توسط کارسرد به‌وجـود می‌آیند) به‌طرف لبه‌های نابجایی حرکت مـی‌کنند، عیوب نقطه‌ای اثر قـابل‌ملاحظه‌ای روی تغییر شکل نمی‌گذارند؛ بنابراین دراین‌مرحلهٔ بازیابی‌فقط انعطاف‌پذیری اندکی به‌وجود می‌آید. میانگین مسیر آزاد الکترونها با ناپدیدشدن عیوب‌نقطه‌ای بلندتر می‌شود؛ بنابراین با ازبین‌رفتن آنها، مقاومت افت می‌کند.




**شکل ۶ـ۶ـ۳** زمان تبلور مجدد، برحسب دما (آلـومینیم، ۷۵٪ سردکاری شده). خط چین: آغاز تبلور مجدد، $R_s$. خط پر: پایان تبلورمجدد. از رابطهٔ آرنیوس( $\ln t$ برحسب $1/T$ ) پیروی می‌شود زیرا تبلور مجدد بـه حرکت اتمها نیاز دارد.

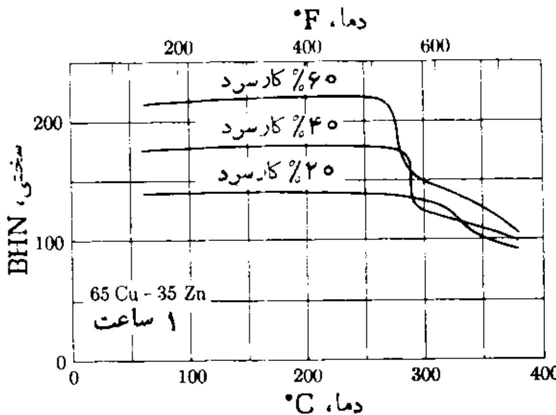
دارد.* ولی زمان عامل دومی است که بردمای تبلور مجدد اثر مـــی‌گذارد. مثلا طبق شکل ۶ـ۶ـ۳ تبلور مجدد آلیاژ آلومینیم خالص تجارتی که ۷۵٪ سردکاری شده در ۳۵۰°C (۶۲۳ K و ۶۶۲ °F) در مدت یك‌دقیقه کامل می‌شود ولی در ۳۰۰°C به ۶۰ دقیقه و در ۲۳۰°C بـه ۴۰ روز نیاز دارد. تعجبی نـدارد زیرا شار اتمها به‌نفوذپذیری بستگی دارد (معادلهٔ ۴ـ۷ـ۱، الف)، که آن‌هم تابعی از دماست (معادلهٔ۴ـ۷ـ۳). این‌امر به‌ما امکان می‌دهد بااستفاده از نمودار آرنیوس ($\ln t$ برحسب $1/T_R$)، طبق شکل ۶ـ۶ـ۳، دمای تبلور مجدد را به‌زمان ارتباط دهیم.

عامل سومی که بردمای تبلور مجدد اثر می‌گذارد مقدار کرنش سختی است. مطابق با داده‌های سختی شکل ۶ـ۶ـ۴، دمای‌تبلور مجدد از ۳۲۰ °C (۶۰۰ °F <) برای برنج ۳۵ـ۶۵ با ۲۰٪ کارسرد تا تقریباً ۲۸۰°C (۵۳۵ °F ~) برای همین برنج با ۶۰٪ کارسرد (هرکدام پس‌از یك‌ساعت تابکاری)، افت‌می‌کند. این مطلب نشان می‌دهد فلزی که کرنش سختی زیادی شده است نسبت به‌فلزی کـه انـدکی سردکاری شده انرژی ذخیرهٔ بیشتری به‌شکل تهیجای و نابجایی دارد (شکل ۴ـ۴ـ۳). بـا دسترسی به‌این انـرژی، اتم برای نوآرایی اتمی و تشکیل دانه‌های تابکاری شده به‌انرژی گرمایی کمتری نیاز دارد. یعنی تبلور مجدد می‌تواند در دمای کمتری صورت گیرد.

بالاخره، مواد خالص نسبت به محلولهـای جـامد در دمـای پایینتری تبلور مجدد می‌یابند. بنابراین سیم‌برقی که ازمس خالص است ازسیمی برنجی کـه به‌همان‌نسبت تغییر شکل‌یافته، بسیارساده‌تر تابکاری‌می‌شود؛ اگرچه‌دمای ذوب‌عکس این‌مطلب را پیش‌گویی می‌کند. دراینجا اساس واصول حرکت نابجاییها را به‌طور مفصل شرح نمی‌دهیم.

**گرمکاری در مقابل سردکاری در فلزات.** درعملیات تولید، که در شکلهای ۶ـ۲ـ۲ و

* حل مسئلهٔ ۴ـ۷ـ۱۴ مقادیر نفوذپذیری را در $0.6\,T_m$ برای آهن، مس و نقره به‌ترتیب $10^{-17.5}$، $10^{-17.3}$ و $10^{-17.4}$ مترمربع در ثانیه داده است. (همهٔ این محاسبات برای ساختار fcc انجام شده است و بنابراین می‌توان آنها را مستقیماً باهم مقایسه‌کرد.)




**شکل ۶-۶-۴** نرم‌شدن‌درحین تابکاری (برنج $65\,Cu-35\,Zn$). پس‌از گرمایش به‌مدت یک‌ساعت تا دمای مشخص شده، سختیها در $20\,^\circ C$ معین شده‌اند، برنجی‌که کرنش‌سختی بیشتری‌شده در دمای پایینتر و با انرژی گرمایی کمتری نرم می‌شود.

۶-۲-۳ شرح داده شد، تفاوت بین گرمکاری و سردکاری تنها در دمای آنها نیست، بلکه به‌رابطهٔ دمای عملیات با دمای تبلورمجدد نیز مربوط می‌شود. به‌فرایندهای شکل‌دادنی‌که در دمایی بالاتر از دمای تبلورمجدد انجام می‌شوند، گرمکاری و به فرایندهای شکل‌دادنی که پایینتر از این‌دما انجام می‌شوند سردکاری گفته می‌شود. بنابراین دمای سردکاری مس ممکن است از دمای گرمکاری سرب بیشتر باشد.

انتخاب دمای تبلورمجدد به‌عنوان نقطهٔ متمایزکنندهٔ گرم و سردکاری از لحاظ تولید کاملا منطقی است. زیر دمای تبلور مجدد، با تغییرشکل بیشتر درحین انجام فرایند فلز سخت‌تر و تردتر می‌شود، توان‌بیشتری برای تغییرشکل لازم است و احتمال بیشتری برای ترک‌خوردن درحین انجام فرایند وجود دارد. بالای دمای تبلور مجدد، فلز خودبه‌خود در حین یا بلافاصله پس‌از انجام فرایند کار مکانیکی، تابکاری می‌شود، بنابراین نرم و نسبتاً انعطاف‌پذیر باقی می‌ماند.

**اهمیت سردکاری و تابکاری ازنظر مهندسی.** کرنش‌سختی به‌وسیلهٔ کارسرد برای مهندس طراح در درجهٔ اول اهمیت قرارد دارد. این‌کار استفاده از قطعات کوچکتر، با استحکام بیشتر را میسر می‌سازد. البته محصول نباید در دماهایی‌که موجب تابکاری فلزات می‌شود به‌کار رود.

کار سرد مقدار تغییرشکل پلاستیکی راکه درحین عملیات شکل‌دادن درفلز به‌وجود می‌آید، کاهش‌می‌دهد. فلز سردکاری‌شدهٔ سخت‌تر و تردتر، برای کار بیشتر به‌توان بیشتری نیاز دارد و در معرض خطر ترک‌خوردگی است. بنابراین چرخه‌های کارسرد - تابکاری

برای کمك به‌تولید به‌کار می‌روند. مثال ۶ـ۶ـ۱ چنین فرایندی را شرح می‌دهد.
درحین کارسرد فقدان انعطاف‌پذیری اثر جنبی مفیدی در ماشینکاری دارد، به‌علت انعطاف‌پذیری کمتر، براده‌ها آسانتر می‌شکنند (شکل ۶ـ۶ـ۵) و کاربرش ساده‌تر صورت می‌گیرد. درنتیجه‌معمولا برای‌فلزی که لازم است در ماشینهای اتوماتیك پیچی بریده شود، سردکاری توصیه می‌شود.

**مثال ۶ـ۶ـ۱** مفتولی از برنج ۳۰ـ۷۰ باید قطر ۵٫۰ mm؛ استحکام کششی بیشتراز ۴۲۰ MPa و ازدیاد طول بیشتراز ۱۸٪ در ۵۰ mm داشته باشد. این مفتول از مفتول ضخیمتر ۹٫۰ mm توسط کشیدن تولیدمی‌شود. مراحل انجام فرایند نهایی را برای‌تولید مفتول ۵٫۰ mm مشخص کنید.

حل: ازشکل ۶ـ۵ـ۶،
CW>٪۱۶ برای $S_t$؛ CW<٪۲۲ برای ازدیاد طول.
برای مرحلهٔ آخر کشیدن از ۲۰٪ سردکاری استفاده می‌شود. از رابطهٔ (۶ـ۵ـ۱)

$$۰٫۲۰=\frac{d^۲\pi/۴-(۵٫۰)^۲\pi/۴}{d^۲\pi/۴}$$

$$d=۵٫۶\mathrm{mm}(=۰٫۲۲\mathrm{in.})$$

توضیح. کارگرم‌از ۹٫۰ mm تا ۵٫۶ mm (یا کار سرد وتابکاری در یك‌یا چندچرخه).
مفتول باید درقطر ۵٫۶ mm تابکاری‌شود سپس‌با ۲۰٪ کارسرد به‌قطر ۵٫۰ mm برسد. ▲


(ب)


(الف)

**شکل ۶ـ۶ـ۵** برش زائده‌های فلز با ماشین‌ابزار. فلز کرنش‌سختی شده در (الف) براده‌های بهتری را تولید می‌کند، در حالی‌که فلز تابکاری شده در (ب) زائده‌های یك‌تکه ایجاد می‌کند.

**مثال ۶ـ۶ـ۲** رابطهٔ زمان ـ دما برای تبلورمجدد کامل آلومینیم درشکل ۶ـ۶ـ۳ از رابطهٔ نوع آرنیوس پیروی می‌کند. رابطهٔ تجربی متناسب با آن را به‌دست آورید.

حل: از منحنی شکل ۶ـ۶ـ۳ در $250\ ^\circ C$ ($523 K$)

$$t = 200 \text{hr} \quad \text{و} \quad T^{-1} = 1{,}91 \times 10^{-3}$$

$$\ln 200 = C + \frac{B}{523}$$

در $327\ ^\circ C$ ($600 K$)

$$t = 0{,}14 \text{ hr} \quad \text{و} \quad T^{-1} = 1{,}67 \times 10^{-3}$$

$$\ln 0{,}14 = C + \frac{B}{600}$$

از حل این دو معادله

$$B = 30000 \text{ K} \quad \text{و} \quad C = -52$$

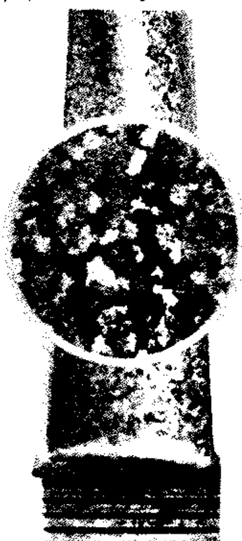
$$\ln t = -52 + \frac{30000 K}{T}$$

توضیح. درست همان‌طور که زوجهای نفوذی جدول ۴ـ۷ـ۲ مقادیر $D_0$ و $E$ مخصوص به‌خود را داشتند. مقادیر $C$ و $B$ فقط برای این آلومینیم خالص تجارتی که ۷۵٪ سردکاری شده است به کار می‌رود. (برای جزئیات بیشتر معادلات (۱۰ـ۱ـ۱) و (۱۰ـ۱ـ۲) را ببینید.) ▲

## ۶ـ۷ رفتار فلزات چندبلوری

فلزی که در قطعهٔ ریختگی (شکل ۶ـ۷ـ۱) یا شمش به‌حالت جامد درآمده است حاوی دانه‌های بسیاری است که‌هر کدام بلور جداگانه‌ای به‌شمار می‌رود. همین امر برای میله، مفتول، ورق، لوله، و... نیز صحت دارد. اندازهٔ دانه‌ها روی تغییر شکل مواد اثر دارد. به‌طورخلاصه در مقایسه با فلزاتی‌که دانه‌های درشت دارند، فلزات ریزدانه در دماهای پایین پراستحکامتر و در دماهای بالا ضعیفترند. درهردو مورد این اثر در درجهٔ‌اول نتیجهٔ مقدار سطح مرزدانه‌هاست. همان‌طور که دربخش ۴ـ۴ ذکر شد، بین ابعاد متوسط دانه و سطح مرزدانه نسبت‌عکس وجود دارد.

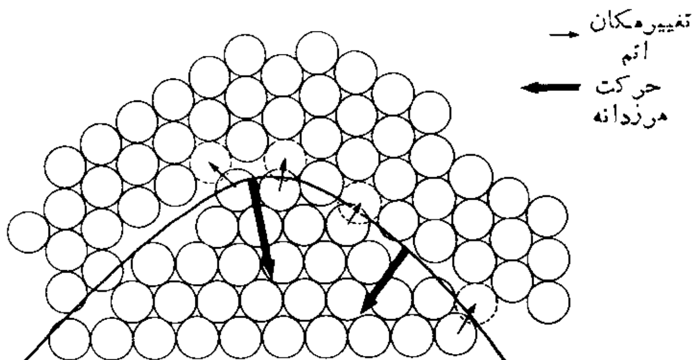
ازآنجاکه اندازهٔ دانه تاحدی قابل‌کنترل است، ابتدا به‌رشد دانه‌ها و سپس به‌آثار اندازهٔ دانه‌ها برتغییرشکل، هم در دمای پایین وهم در دمای بالا، نظر خواهیم کرد.



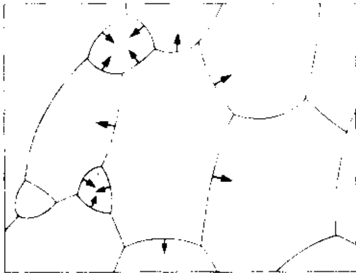
**شکل ۶-۷-۱** فلز درشت دانه در پره‌های توربین ریخته‌گـری شده، این پره‌ها در دماهای بـالا به‌کارمی‌رونـد؛ بنابراین سطح مرزدانه‌ها با گسترش دانه‌های درشت‌درحین‌فرایند، به‌کمینه‌می‌رسند. در عوض، مرزدانه‌ها در دماهای پایین‌استحکام‌را افزایش می‌دهند.

**رشد دانه‌ها در فلزات.** اگر دمـا تحرك اتمی مهمی تولید نکند (بخش ۴-۷) میانگین اندازهٔ دانه‌هـا درفلز تك‌فاز با زمـان افزایش می‌یابد. نیروی محرکهٔ رشد دانه‌ها انرژیی است که باعبور دانه‌ها از مرزدانه‌ای که سطح مقعر دارد به‌دانه‌ای با سطح محدب، آزاد می‌شود. درآنجا اتم به‌طورمتوسط باتعدادبیشتری اتم، درفواصل بین اتمی متعادل، همسایه است (شکل ۶-۷-۲). در نتیجه مرز دانـه به‌طرف مرکز انحنا حرکت می‌کند. از آنجا که‌دانه‌های کوچك‌نسبت به‌دانه‌های درشت‌سطوحی با تحدب بیشتر دارند، ناپدید می‌شوند زیرا دانه‌هـای بـزرگتر را تغذیه می‌کنند (شکل ۶-۷-۳). نتیجهٔ نهایی، رشددانه است (شکل ۶-۷-۴).

تمام مواد بلورین، فلزات و غیرفلزات دارای این ویژگیهای رشد دانه هستند. یخ




**شکل ۶-۷-۲** حرکت مرزدانه‌ها. اتمها به‌طرف دانه‌ای که سطح محدب دارد و درآنجا پایدارترند حرکت می‌کنند. در نتیجه مرزدانه‌ها به‌طرف مرکز انحنا تغییرمکان می‌یابند.



**شکل ۶-۷-۳** رشد دانه. مرزدانه‌ها به‌طرف مرکز انحنا حرکت می‌کنند. (علامتها) درنتیجه درآخر دانه‌های کوچک ناپدید می‌شوند.

حاصل از برف انباشته شده مثال جالبی درمورد رشد دانه‌هاست. دانه‌های برف به‌شکل تعداد زیادی بلور کوچك یخ درمی‌آیند با گذشت زمان همانندیشان را از دست می‌دهند و با بلورهای یخ‌دانه‌دانه‌ای بزرگتر جایگزین می‌شوند، تعدادکمی از بلورها با ازبین رفتن بلورهای کوچکتر رشد می‌کنند.

سرعت‌رشد به‌دما بستگی بسیار دارد. افزایش دما انرژی نوسانی گرمایی را افزایش می‌دهد که آن نیز به‌نوبهٔ خود به‌نفوذ از مرزدانه‌های کوچکتر به دانه‌های بزرگتر شتاب می‌دهد. کاهش بعدی در دماحرکت مرز دانه‌هارا کندتر می‌کند، ولی آن‌را عکس نمی‌کند.



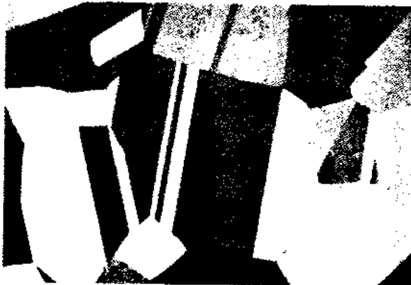
(الف) ۱۵ دقیقه در ۵۸۰°C



(ب) ۱ ساعت در ۵۸۰ °C (۱۰۷۶ °F)



(ج) ۱۰ دقیقه در ۷۰۰ °C



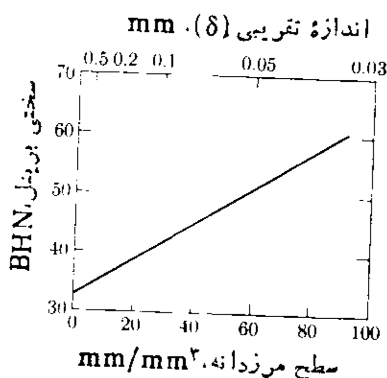
(د) ۱ ساعت در ۷۰۰ °C (۱۲۹۲ °F)

**شکل ۶-۷-۴** رشد دانه (برنج با بزرگنمایی ۴۰).

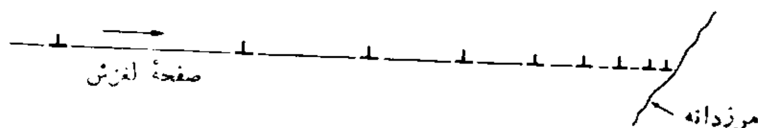
تنها راه‌کاهش (ریزکردن) اندازهٔ دانه‌ها در آلیاژهایی‌که همیشه یک‌فاز دارند تغییرشکل پلاستیکی‌دانه‌ها وایجاد دانه‌های‌جدید توسط‌تبلورمجدد است (بخش۶ـ۶).

**تغییرشکل در دماهای پایین.** شکل ۶ـ۷ـ۵ سختی برنج ۳۰ـ۷۰ تابکاری شده را به‌صورت تابعی از سطح مرزدانه نشان می‌دهد. مرزدانه‌ها جلوی لغزش را می‌گیرند زیرا نابجاییها با کوشش برای ورود به‌دانهٔ جدید باید جهت حرکت خود را تغییر دهند. دانهٔ مجاور بدون تغییر نسبت به دانه‌ای‌که لغزش در آن ایجاد شده می‌چرخد. (اگر دو دانه هم‌راستا باشند مرزدانه‌ای وجود نخواهد داشت.) بنابراین برای ادامهٔ لغزش وعبور از مرزدانه نیروی بیشتری لازم است. معمولاً تجمعی از نابجاییها موجود است که همان اثر شلوغی ترافیک در بزرگراه اصلی را دارد (شکل ۶ـ۷ـ۶).

☐ تغییرشکل فلزات چندبلوری با تغییرشکل فلزات تک‌بلوری از جنبهٔ دیگری هم متفاوت‌است. تک‌بلور شکل ۶ـ۴ـ۱ توسط بلورهای مجاور تحت‌فشار قرار نگرفته است. برای مقایسه شکل ۶ـ۵ـ۲ را ببینید. در این شکل واضح است‌که دانه‌های بزرگ مس در مرکز، مستقل از دانه‌های همسایهٔ خود تغییرشکل پلاستیکی نمی‌یابند. درصورتی که دانه‌ها بخواهند همراه همسایه‌های خود و بدون‌ایجاد ترک یا شکافی تغییرشکل یابند، حداقل پنج سیستم (جدول ۶ـ۴ـ۱) باید همزمان باهم در داخل دانه عمل کنند. ازآنجاکه تمام




**شکل ۶ـ۷ـ۵** سختی برحسب رشد دانه (برنج ۳۰ـ۷۰ تابکاری شده) دانه‌های بزرگتر با سطح مرزدانهٔ کمتر، نرمترند.

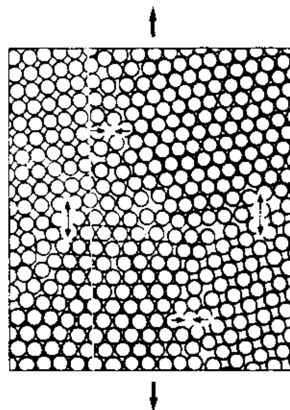



**شکل ۶ـ۷ـ۶** تجمع نابجاییها. مرزدانه یا سطح در دمای پایین مانع ادامهٔ حرکت نابجاییها می‌شود. ⊥= نابجایی لبه‌ای

صفحات لغزش به نحو مطلوبی قرار نگرفته‌اند [مثال ۶ـ۴ـ۲ (ب)]، علت این امر را در می‌یابیم که چرا فلزات bcc و fcc، با سیستمهای لغزشی بیشتر، فلزات انعطاف‌پذیری‌اند؛ و فلزات hcp انعطاف‌پذیری کمتری دارند (جدول ۶ـ۴ـ۱).

☐ **تغییرشکل در دماهای بالا.** در شکل ۶ـ۷ـ۵ دیدیم که فلزات ریزدانه در دماهای پایین سخت‌تر و بنابراین پراستحکامتر از فلزات درشت دانه‌اند. در دماهای بالا وضعیت عکس می‌شود. در بالاتر از دماهایی که اتمها حرکت قابل توجهی را شروع مـی‌کنند، مرزدانه منشأ ضعف ماده است. با کمك شکل ۶ـ۷ـ۷ می‌توان آن را بیشتر درك کرد. این شکل طرحوارهٔ چندین دانه راکه در جهت‌عمودی تحت کشش قرارگرفته‌اند نشان می‌دهد. اگر در یك‌جهت کشش وجود داشته‌باشد، درجهت عمود بر آن انقباض وجود دارد. (به نسبت پواسون، بخش ۶ـ۳ رجوع کنید) بنابراین اتمها در مرزدانه‌هایی که به‌صورت عمودی قرارگرفته‌اند تمرکز مـی‌یابند و فضای بین اتمهایی کـه در مرزهای افقی قرارگرفته‌اند بیشتر می‌شود. این‌امرموجب نفوذ ازمرزهای افقی می‌شود، که نتیجهٔ کلی‌آن تغییرتدریجی درشکل فلز است.*

کرنشی که شرح داده شده یکی از مکانیسمهای خزش است. اگر دانه کوچکتر باشد یعنی سطح مرزدانه بیشترباشد، خزش سریعتر صورت می گیرد. در طول مرزدانه‌های افقی



**شکل ۶ـ۷ـ۷** مـرزدانه‌هـا و تغییرشکل (طرحواره). تحت کشش، در مرزدانه‌های عمودی تمرکز اتمها به وجود می‌آید و اتمها توسط نفوذ از آن خارج‌می‌شوند؛ مرزدانه‌های‌افقی اتمهای تغییر مکان یافته را دریافت می‌کنند زیرا فضای اضافی‌درآنها به‌وجودآمده است. خزش حاصل عامل مهمی در کاربرد مواد در دماهای بـالاست، که در آن اتمها ساده‌تر نفوذ می‌کنند (شکل اصلی، شکل ۴ـ۴ـ۷ است).

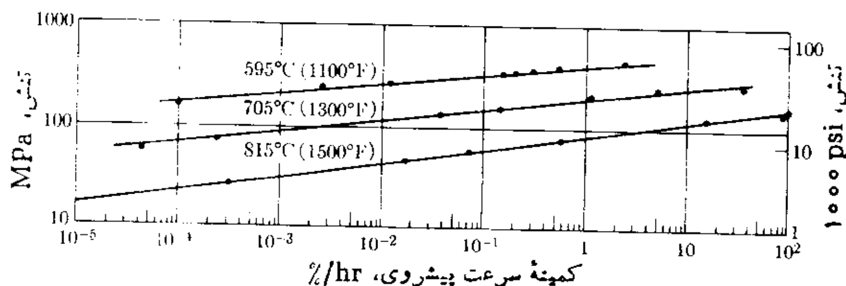
* نیروهای فشاری تغییرات مشابهی ولی درجهت عکس، ایجاد می‌کنند.

محلهای بیشتری برای «غرق‌شدن» اتمهاوجود دارد و «منابع» تأمین اتمها در مرز دانه‌های عمودی بیشتر است (شکل ۶ـ۷ـ۷). مسئله‌ای که حتی اهمیت بیشتری دارد آن است که فاصله‌های نفوذی در مواد ریزدانه کمتر است.

البته این مکانیسم خزش در دماهای پایین که در آن حرکت اتمها قابل اغماض است صورت نمی‌گیرد، ولی باافزایش مقدار نفوذپذیری، $D$، برای خود نفوذی، حرکت اتمها به‌صورت تابع نمایی افزایش می‌یابد (بخش ۴ـ۷). همانند تبلور مجدد دمایی که در آن اثر اندازهٔ دانه به‌این صورت تغییر می‌کند تابعی از زمان، استحکام پیوند، ناخالصی و... است.

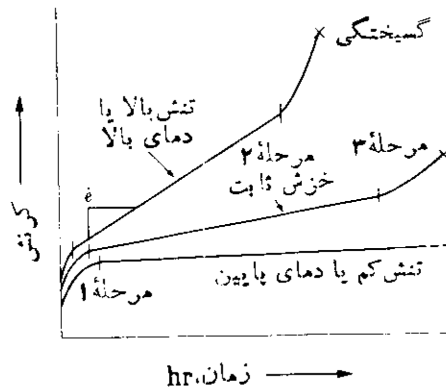
□ **کاربرد در دمای بالا.** همان‌طور که از نام آن پیداست، خزش فرایند ایجاد تدریجی کرنش است. سرعت آن از چند درصد در ساعت درسطوح تنش بالا یا در دماهای بالا، تا کمتر از $10^{-4}$٪ در ساعت* تغییر می‌کند (شکل ۶ـ۷ـ۸). این مقادیر کم است، ولی اهمیت آن را در طراحی نیروگاهها یا رآکتورهای اتمی درنظر بگیرید که باید سالها در دمای بالا کار کنند. به‌همین ترتیب در توربینهای گازی و در تجهیزاتی که باید بدون تغییر در اندازه‌ها تحت تنشهای بالا و در دماهای بالا کار کنند تا بیشینهٔ کارآیی تبدیل انرژی را داشته باشند، خزش اهمیت پیدا می‌کند.

می‌توانیم کرنش را به‌صورت تابعی از زمان برای تنشها و دماهای مختلف رسم کنیم. شکل ۶ـ۷ـ۹ طرحوار است. اگر فلزی تحت تنش قرار گیرد، بلافاصله تغییرشکل کشسان می‌یابد. درصورتی که تنش یا دما بالا باشد تغییرشکل نیز بیشتر خواهد شد. در دورهٔ کوتاه اول (مرحلهٔ ۱) درنقاطی که تمرکز تنش وجود دارد، درطول مرزدانه‌ها و در عیوب داخلی، تغییرشکل پلاستیکی‌اضافی، نسبتاً سریع به‌وجود می‌آید. این تغییرشکل اندك اولیه راه را برای کرنشی باسرعت نسبتاً ثابت تحت عنوان سرعت خزش، $\dot{\varepsilon}$، باز




**شکل ۶ـ۷ـ۸** داده‌های خزش فولاد زنگ‌نزن نوع ۳۱۶، تنشهای بالاتر و دماهای بالاتر، سرعت خزش را بالا می‌برند.

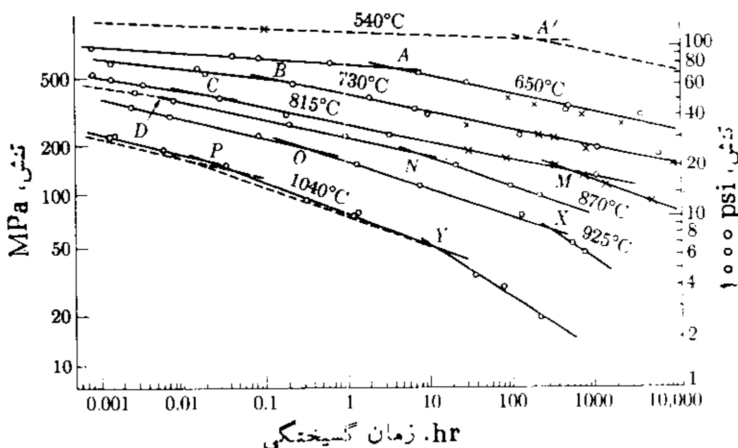
* تقریباً ۱٪ در سال.




**شکل ۶-۷-۹** خزش. سرعت ثابت خزش درمرحلهٔ دوم، عمرمفید ماده‌را مشخص می‌کند.

می‌کند. مرحلهٔ دوم یعنی خزش‌ثابت تا مدت زیادی ادامه می‌یابد، تا کرنش کافی به‌وجـود آمده وکاهش سطح و گلویی پدید آید. با این‌تغییرسطح در بـار ثابت، سرعت‌کرنش زیاد می‌شود تا شکست به‌وجود آید (مرحلهٔ ۳). اگر بار بتواند مطابق با کاهش حجم تغییر کند و بنابراین تنش ثابت بماند، سرعت خزش مرحلهٔ ۲ تا شکست ادامه می‌یابد.

درشکل ۶-۷-۹ طرحوارهٔ روابط زیردیـده مـی‌شود: (۱) سرعت ثابت خزش با ازدیاد دما و تنش، هردو، افزایش می‌یابد. (۲) کل کرنش درنقطهٔ شکست نیز بااین‌متغیرها افزایش می‌یابد. (۳) زمان قبل‌از شکستِ نهایی در اثر تنش گسیختگی، با افزایش دما و تنش اعمال شده کاهش می‌یابد (شکل ۶-۷-۱۰).



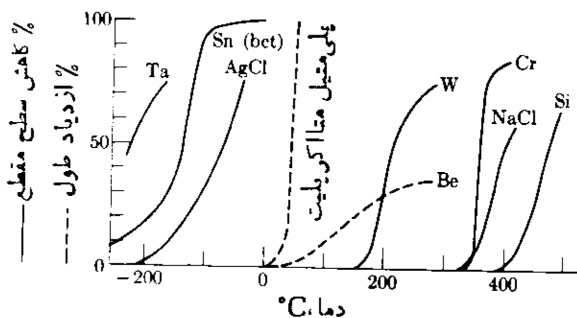

**شکل ۶-۷-۱۰** داده‌های‌تنش گسیختگی. زمان‌شکستن با بالارفتن تنش و دما کمتر می‌شود.

## □ ۶-۸ شکست

آزمایش تنش ـ کرنش (شکل ۱ـ۲ـ۲) باشکست پایان‌می‌یابد. قبل‌از شکست ممکن است تغییر شکل وجود داشته یا نداشته‌باشد. اگر تغییر شکل پلاستیکی به‌وجود آید شکست انعطاف‌پذیر اتفاق افتاده است در غیراین‌صورت شکست ترد است. چقرمگی مربوط به‌آن را می‌توان با (۱) اندازه‌گیری انعطاف‌پذیری (به‌صورت درصد ازدیاد طول یا درصد کاهش‌سطح‌مقطع) یا با (۲) انرژی جذب‌شده درآزمایش‌ضربه* نشان داد (شکل ۱ـ۲ـ۴).

**دمای انتقال.** در بسیاری از مواد انتقال ترد ـ انعطاف‌پذیر مشاهده می‌شود. این مواد دارای دمای مشخصی برای تغییرند (شکلهای ۶ـ۸ـ۱ و ۶ـ۸ـ۲). در دماهای پایین ترك می‌تواند سریعتر ازتغییرشکل‌پلاستیکی به‌وجودآید، بنابراین انرژی‌اندکی‌جذب می‌شود. دردماهای بالاتر، قبل‌از شکست‌باصرف انرژی تغییرشکل به‌وجود می‌آید. این‌ناپیوستگی درجذب انرژی از ویژگیهای فلزات bcc است؛ درنتیجه طراح برای استفاده ازفولادها در دماهای پایین باید دقت‌کافی به‌عمل‌آورد.**

دمای انتقال باسرعت بارگذاری تغییر می‌کند. بنابراین در فولادی‌که به‌آهستگی تغییرشکل پیدا می‌کند ممکن است شکست انعطاف‌پذیر رخ دهد، در حالی‌که تحت ضربه ممکن است به‌صورت ترد بشکند، زیرا برای به‌وجود آمدن تغییرشکل پلاستیکی فرصتی وجود ندارد. داده‌های شکل ۶ـ۸ـ۲ برای بارگذاری ضربه‌ای است. این داده‌ها برای نمونه‌هایی‌باشکل هندسی‌استاندارد است، زیرا این‌را نیزمی‌دانیم که‌انرژی لازم،به‌توزیع

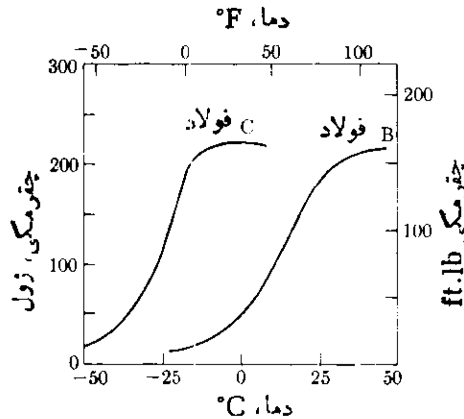



**شکل ۶ـ۸ـ۱** انعطاف‌پذیری برحسب‌دما (آزمایشهای‌کشش). به‌استثنای فلزات fcc، بیشتر مواد در دماهای پایین انعطاف‌پذیری خود را به‌طور ناگهانی از دست می‌دهند. برای هر ماده‌ای هنگام افزایش سریع کرنش مثلا دربارگذاری ضربه‌ای دمای انتقال بیشتر است.

---

* نتایج آزمایش ضربه گاهی به‌جای انرژی ضربه‌ای «استحکام ضربه‌ای» نامیده می‌شود.

** چقرمگی فلزاتی مثل مس و آلومینیم (fcc) باکاهش دما، به‌طور ناگهانی تغییر نمی‌کند.




**شکل ۶-۸-۲** انتقال چقرمگی. برای هرفولادی دردمـای پایین کاهش مشخصی در چقرمگی وجود دارد. دمای انتقال برای فولاد C (ریزدانه) بسیار کمتر از فولاد B (ناآرام) است.

سه‌بعدی تنش درهمسایگی ترك بستگی دارد. مثلا باوجود آنکه مقدار دقیق دمـای انتقال برحسب شکل هندسی تغییر می‌کند، ولی برای طراحی کشتیهایی که با استفاده ازجوشکاری ساخته مـی‌شوند و در آبهای زمستانی شمال آتـلانتیك مـورد استفاده قرار مـی‌گیرند، آرشیتکتهای نیروی‌دریایی فولاد C درشکل ۶-۸-۲ را به‌فولاد B ترجیح می‌دهند. وقتی در فولادی با دمای انتقال بالا، ترکی به‌وجود می‌آید، بـا انرژی شکست‌کمی انتشار این ترك تاشکستن کامل کشتی ادامه می‌یابد. قبل‌از آنکه طراحان استفادهٔ صحیح از روابط را یاد بگیرند ومتخصصان متـالورژی دریابند که فولادهای ریزدانه در مقایسه بـا فولادهای درشت‌دانه دمای انتقال کمتری دارند، فجایع بسیاری به‌وجود آمد.

**خستگی**• نمونه‌های مستند بسیاری از شکست استوانه‌های چرخـان در توربینهای برق و در سایر تجهیزات مکانیکی که به‌نحو رضایتبخشی‌درمدت زمانی طولانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، دیده شده است. شکل ۶-۸-۳ یکی از این شکستها را نشان می‌دهد.*

تنشهایی که‌ماده می‌تواند تحت بار چرخه‌ای تحمل کند خیلی کمتر از تنشهای بارگذاری استاتیك‌است. از استحکام کششی فقط‌می‌توان به‌صورت راهنمایی در طراحی ساختارهایی که تحت بار استاتیك به‌کار مـی‌روند استفاده‌کرد. تعداد چرخه‌هایی کـه فلز درآن دوام می‌آورد، $N$، با افزایش تنش، $S$، کاهش می‌یابد. شکل ۶-۸-۴ منحنی کلی $S$-$N$ برای

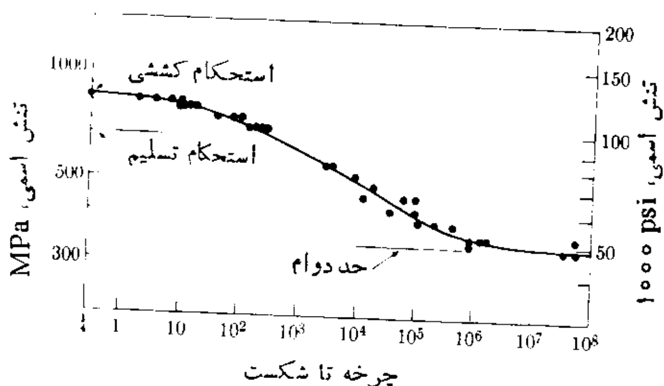
* ابتدا گفته می‌شد که فلز خسته می‌شود و از خستگی می‌شکند. اکنون می‌دانیم کـه شکست دراثر خستگی نتیجهٔ حرکت نقطه‌ای در میکروساختار است که موجب انتشار ترك می‌شود.



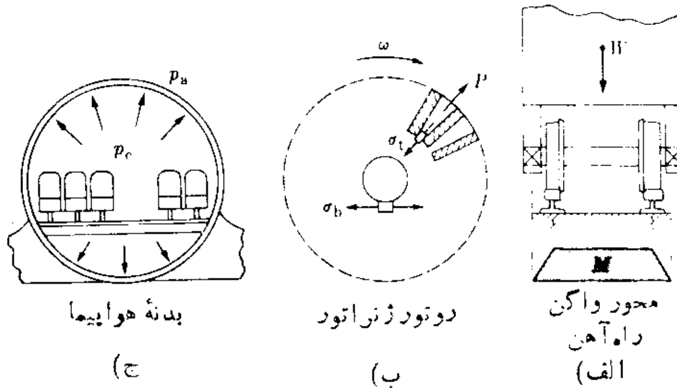
**شکل ۶ـ۸ـ۳** شکست در اثر خستگی (در استوانهٔ فولادی ۱۴ سانتی‌متری). شکست بسیار آهسته از سوراخ پیچ‌تنظیم در بالا شروع می‌شود. تقریباً ۹۰٪ سطح مقطع را در برمی‌گیرد و بعد سریعاً می‌شکنند (پایین).

شکست فولادها در اثر خستگی‌است. درطراحی بارگذاری چرخه‌ای نامحدود، لازم است که تنش را به‌مقادیر زیرحد دوام این منحنی محدود کنیم.

شکل ۶ـ۸ـ۵ سه‌نمونه از بارگذاری چرخه‌ای را نشان می‌دهد. محور واگن قطار تحت چرخه‌های تنش سینوسی بسیاری قرار می‌گیرد. نمونه‌هایی از تنشهای چرخه‌ای کم در روتور مولد برق یافت می‌شود. این واحد تحت عنوان واحد «عالی» درهنگامی که مقدار برق موردنیاز در اوج‌است به‌کارمی‌رود و درهرسال تا ۱۰۰۰ مرتبه روشن‌وخاموش




**شکل ۶ـ۸ـ۴** منحنی $S-N$ (فولاد SAE ۴۱۴۰ یکنواخت شده). $S-N$ = تنش چرخه‌ای برحسب تعداد چرخه‌ها تا شکست. درحد دوام، تعداد چرخه‌ها به‌طور نامعینی زیاد می‌شود.




**شکل ۶-۸-۵** نمونه‌هایی از بارگذاری چرخه‌ای. الف) محور واگن راه‌آهن؛ ب) روتور مولد برق درحین روشن و خاموش‌شدن؛ ج) بالا و پایین رفتن فشار در هواپیما. درمورد آخر ممکن است فقط با چندهزار چرخه مواجه شویم؛ ولی همان‌طورکه در شکل ۶-۸-۴ دیده می‌شود، نمی‌توان استحکام تسلیم را درنظر گرفت.

می‌شود؛ هربار، چرخه‌ای از تنش را در قاعدهٔ شکاف سیم‌پیچی و در میل مرغك اعمال می‌کند. به‌همین‌ترتیب بدنهٔ هواپیما درهنگام بالارفتن فشار پس‌از هربار بلندشدن آن، تحت‌تنش قرار می‌گیرد، این‌تنشها به‌محض آنکه هواپیما به‌زمین می‌نشیند برطرف‌می‌شوند.

ترکهای‌ناشی از خستگی‌معمولا ازسطح آغاز می‌شوند، درجایی‌که خمش یا پیچش بیشترین تنش را به‌وجودآورده و درمحلی‌که بی‌نظمیهای سطحی موجب تمرکز تنش شده است. درنتیجه حد‌دوام نسبت به‌پرداخت سطحی بسیارحساس است (جدول ۶-۸-۱).

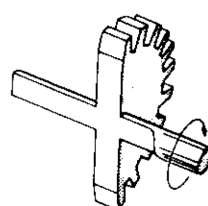
آزمایش دقیق اولین مراحل انتشار ترك نشان می‌دهدکه لغزش میکروسکوپی و غیرقابل برگشتی در هردانه به‌وجود می‌آید.* در اطراف این صفحات لغزش، کاهشی تدریجی در انعطاف‌پذیری وجود دارد که موجب تشکیل ترکهای میکروسکوپی می‌شود. این‌امر ممکن‌است پس‌ازفقط ۱۰٪ تا ۲۰٪ ازعمر نهایی فلز دراثر خستگی، صورت‌گیرد. درحین چرخه‌های باقیمانده ترك به‌آهستگی پیشرفت می‌کند؛ عاقبت سطح مقطع به‌حدی کاهش می‌یابد که شکست ناگهانی نهایی اتفاق می‌افتد (شکل ۶-۸-۳).

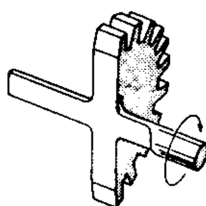
در طراحی، هرنوع عاملی‌که موجب تمرکز تنش شود می‌تواند موجب شکست قبل‌ازموعد شود. قبلا در جدول ۶-۸-۱ اهمیت پرداخت سطحی را دریافتیم. محلهایی شبیه‌به‌سوراخ‌کلید و سایر شکافها (شکل ۶-۸-۳) نیز بحرانی‌اند. بالاخره توصیه می‌شود همان‌طورکه شکل ۶-۸-۶ نشان می‌دهد گوشه‌ها پرشوند.

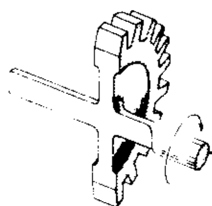
* این‌لغزش موجب‌ناصاف‌شدن سطح خارجی دانه‌می‌شود، حتی اگر به‌خوبی پرداخت‌شده‌باشد. سپس این‌امر موجب تمرکز بیشتر تنش می‌شود.

**جدول ۶-۸-۱** پرداخت سطحی برحسب حد دوام
(فولاد SAE ۴۰۶۳، که تا $R_C$ ۴۴ آب داده شده و بازپخت شده است.)

| نوع پرداخت | صافی‌سطح µm | حد دوام MPa |
|---|---|---|
| سنگ محور | ۶ر۰–۴ر۰ | ۶۳۰ |
| پرداخت ماشینی | ۵ر۰–۳ر۰ | ۷۲۰ |
| سنگ تخت | ۳ر۰–۲ر۰ | ۷۷۰ |
| تمامکاری عالی (پرداخت شده) | ۱۵ر۰–۰۸ر۰ | ۷۸۵ |
| تمامکاری عالی (پرداخت شده) | ۰۵ر۰–۰۱ر۰ | ۸۰۵ |


(الف) طراحی ضعیف


(ب) طراحی بهتر


(ج) طراحی بهتر

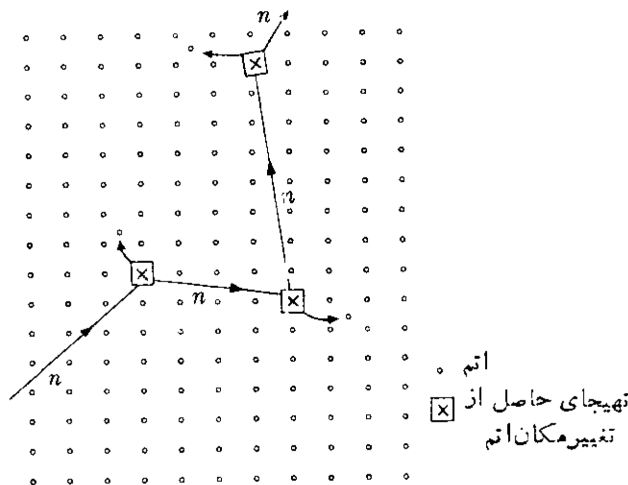
**شکل ۶-۸-۶** طراحی گوشه‌های پر شده. به‌طورکلی استفاده از پرکردن‌گوشه‌ها در طراحیهای مهندسی مکانیك توصیه مـی‌شود. دیده می‌شود حتی باوجود آنکه مواد بیشتری تراشیده شده است، طرح (ج) بهتراز طرح (الف) است. البته اگر مواد بیش‌ازحد تراشیده شود ممکن‌است شکست دراثر مکانیسم دیگری بجز خستگی صورت‌گیرد.

## □ ۶-۹ زیانهای حاصل از تشعشع

انتخاب مواد، کلید طراحی موفقیت‌آمیز رئاکتورهـای هسته‌ای است. در درجهٔ اول در صورتی‌کـه مشکلی درآن ایجاد شود بـاید «در برابر شکست ایمن باشد» در درجهٔ دوم محیط اطراف محل تشعشع ممکن است ساختار بسیاری از مواد را تغییر دهد. ازآنجاکه این تغییرات معمولا مـوجب تغییر نامطلوب در خـواص مـی‌شوند، آنها را تحت‌عنوان زیانهای حاصل از تشعشع نام می‌بریم. دراین فصل‌فقط به‌تابش نوترون و اثرات آن روی فلز مـی‌پردازیم، ولـی انـواع دیگری از تشعشع مثل ذرات $\alpha$ (یـون $He^{2+}$)، اشعهٔ $\beta$

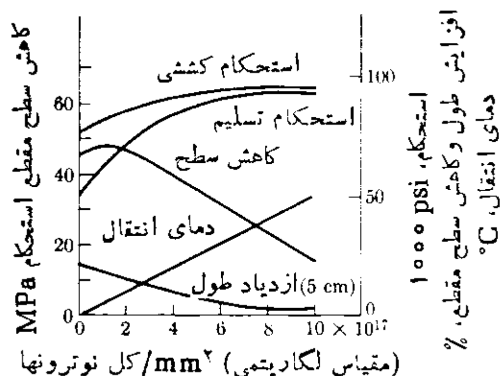
(الکترونهای پرانرژی)، و اشعهٔ $\gamma$ نیز وجود دارد. در فصل ۷ خواهیم دید که تشعشع بر پلی‌مرها نیز اثر می‌گذارد.

**برخورد نوترونها با اتمها.** ازآنجا که نوترونها بارندارند، اگر انرژی کافی به‌آنها داده شود می‌توانند بدون آنکه مانند اشعهٔ $\beta$، پروتون یا ذرات $\alpha$ جذب یونها شوند، به‌طور مستقیم از میان ماده عبور کنند. نوترونها فقط وقتی با اتمها برهم‌کنش می‌کنند که با هستهٔ آن «برخورد» کنند و چنین برخوردی وقتی روی می‌دهدکه از بسیاری از اتمها گذشته باشند. وقتی دربلور برخوردی روی‌می‌دهد، نوترون منحرف می‌شود، اتم(یا یون) راازمحل خود دربلور تغییرمکان می‌دهد وتهیجای وبین‌نشینی اتمی به‌وجود می‌آید (شکل ۶–۹–۱). ازآنجا که‌هر برخوردی حرکت‌نوترون را کند می‌کند. برخوردها بیشتر می‌شود تابالاخره نوترون توسط اتم گیر می‌افتد.*




**شکل ۶–۹–۱** تغییر مکان اتم توسط نوترون. وقتی نوترونی با اتم برخورد می‌کند، قسمتی از انرژی برای حرکت‌دادن اتم ازمحل خود در شبکه به‌محل بین‌نشینی صرف می‌شود.

* گیراندازی نوترون موجب به‌وجود آمدن تغییر ایزوتوپی در اتم دریافت‌کننده می‌شود. مثلا وقتی هستهٔ منیزیم با ۳۰ نوترون و ۲۵ پروتون، نوترونی می‌گیرد، ۳۱ نوترون و ۲۵ پروتون خواهد داشت. این ایزوتوپ مخصوص منگنز ناپایدار است (نیمه‌عمر = ۲٫۵۹ساعت) و دیر یا زود الکترونی (اشعهٔ $\beta$) از نوترون هسته از دست می‌دهد وآهن به‌وجود می‌آورد که حاوی ۳۰ نوترون و ۲۶ پروتون است، $n \rightarrow p^{+} + e^{-}$.

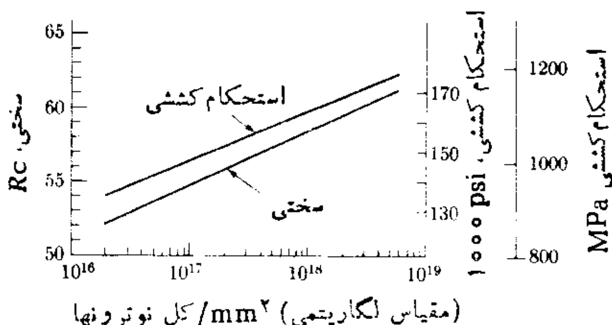



**شکل ۶ـ۹ـ۲** زیانهای تابش روی فولاد (ASTM A–۲۱۲–B فولاد کربنی سیلیسیم‌دار).

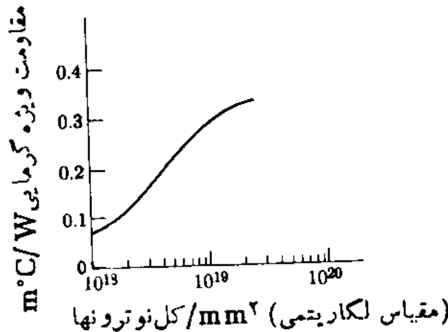
تغییرمکان‌اتم عیوب و اعوجاجی‌در ساختارجامد به‌وجود می‌آورد. تغییرات حاصل درخواص شبیه به‌تغییرات ناشی از سردکاری وکرنش سختی است.

شکل ۶ـ۹ـ۲ اثر تشعشع نوترون را روی‌خواص مکانیکی فولادکربنی سیلیسیم‌دار نشان می‌دهد. تغییر هریك از خواص به‌این علت است‌که سهولت لغزش درشبکهٔ اعوجاج یافته، کاهش می‌یابد.

درنظر اول استفاده ازتشعشع به‌عنوان روش‌سخت‌کردن و استحکام‌دادن به‌فلز به‌نظر جالب مـی‌آید. ولی معایب ذاتی بسیاری دارد. اولا همان‌طورکـه شکل ۶ـ۹ـ۳ برای فولاد زنگ‌نزن ۳۴۷ نشان می‌دهد، اثر تشعشع تابعی است لگاریتمی از میزانی‌کـه فلز




**شکل ۶ـ۹ـ۳** سخت‌کردن‌تشعشعی (فولاد زنگ‌نزن‌نوع۳۴۷). نوترونها اتمها را ازمحل خودمی‌رانند وبنابراین‌لغزش را درفلز محدود می‌کنند. از آنجاکه جریان نوترون در مقیاس لگاریتمی کشیده است، هـر چرخه به‌تشعشع نسبتاً طولانیتری نیاز دارد.




**شکل ۶-۹-۴** مقاومت‌ویژه برحسب تشعشع نوترون (گرافیت بـه موازات جهت بلوری ترجیحی).

درمعرض تشعشع قرارگرفته‌است. تشعشع لازم برای‌افزایش‌سختی به‌تدریج بیشتر می‌شود. ثانیاً گرفتن نوترون و فعالسازی اشعهٔ گاما که به‌همراه تشعشع به‌وجود می‌آید، ممکن است از لحاظ رادیولوژیکی مادهٔ «داغی» به‌وجود آورد.

مقاومتهـای ویژهٔ گرمـایی و الکتریکی بـا تابش نوترون افزایش می‌یابند. شکل ۶-۹-۴ اثر آن را روی مقاومت‌گرمایی نشان می‌دهد. افزایش هر دو مقاومت را می‌توان از اطلاعات مربوط به‌تغییر تحرك الکترون در جاهـایی‌که درآنها اعـوجاج ایجاد شده پیش‌بینی کرد (بخش ۵-۲).

**از بین‌بردن زیانهای حاصل از تشعشع.** زیانهای‌حاصل از تشعشع‌را می‌توان با تابکاری مناسب در دماهـای بالا ازبین برد. مـکانیسم از بین‌بردن این اثرات شبیه به‌مکانیسم تبلور مجدد است (بخش ۶-۶). ولی دمـای لازم معمولاً کمتر است. علت‌آن معلوم است زیرا یکایك اتمها به‌محلی که نسبت به‌محل معمول‌آنها درطـول نابجایی انرژی بیشتری دارد تغییرمکان داده‌اند.

## مرور و بررسی مطالب

فلزات رسانندگی الکتریکی و گرمایی بالایی دارند زیرا حـاوی الکترونهای آزادند. همچنین معمولاً استحکام خوبی‌همراه با انعطاف‌پذیری زیاد دارند. این‌امر شکل‌دادن آنها و ساختن قطعات صنعتی و مصرفی را میسر می‌سازد. بنابراین دراین فصل بررفتار فلزات به‌عنوان تابعی از عناصر آلیاژی، تغییرشکل و دماهای بالا تأکید شد و توجه ما به‌فلزاتی که فقط یك‌فاز دارند محدود شد. مواد چندفاز را در فصول آینده بررسی خواهیم‌کرد.

### خلاصه

آلیاژهای تك‌فاز از فلزخالص مستحکمترند. این خاصیت، محلول‌سختی نام داردکه یکی از دو وسیلهٔ اصلی بـالابردن استحکام مس و آلیاژهـای آن‌است، همچنین برای افزایش

استحکام آلیاژهـای مقاوم در دمای بالا به‌کار می‌روند. علت محلول سختی آن است که اتمهای ناخالصی درطول صفحات لغزش مانع حرکت نابجاییها می‌شوند.

متغیرهای میکروساختارهـای تك‌فاز شامل (۱) اندازهٔ دانه (۲) شکل دانه؛ و (۳) جهتگیری دانه‌هاست. رشد دانه درتمام دماها صورت می‌گیرد ولی قبل‌از آنکه دمـا از نصف دمـای ذوب بیشتر شود، فوق‌العاده آهسته است. در دماهای پایین، مرزدانه‌ها مانع تغییرشکل پلاستیکی مـی‌شوند؛ بنابراین فولادهـای ریزدانه پراستحکامتر از فولادهـای درشت دانه‌اند. در دماهای بالا وضعیت عکس مـی‌شود زیرا حرکت اتمها در داخل فلز جامد آسانتر صورت می‌گیرد.

مدول برشی نسبت تنش برشی به‌کرنش برشی کشسان است. مدول کشیدگی فشار هیدرواستاتیکی را به‌تغییرحجم کشسان مربوط مـی‌کند. هردو این مدولها را می‌توان از مدول‌یانگ (بخش ۱ـ۲) ونسبت‌پواسون به‌دست‌آورد. مدول‌کشسانی معمولا چندسواست.

فلزات توسط برش تغییرشکل می‌یابند. بنابراین آنچه که برای تغییر شکل پلاستیکی اهمیت دارد جزء تفکیك شدهٔ برشی تنشهای محوری است. تنش برشی بحرانی هریك از سیستمهای لغزشی تفاوت دارد.

کرنش سختی درنتیجهٔ تغییرشکل‌پلاستیکی اولیه به‌وجود می‌آید. بنابراین هرنوع فرایند شکل دادن سرد، خواص مکانیکی را تغییر می‌دهد. پس‌از محلول سختی، این دومین روش عمده برای بهبود خواص فلزات است. متأسفانه معمولا با افزایش سختی کاهشی در انعطاف‌پذیری نیز به‌وجود می‌آید. در دماهای بالا، نوآرایی اتمها مـی‌تواند رخ دهد و آثار سردکاری از بین برود و بـدین‌وسیله فلز نرمتر و انعطاف‌پذیری آن بیشتر شود. این روش را تابکاری و تبلور مجدد می‌نامیم زیرا بلورهـای جدیدی تشکیل مـی‌شوند. اگر فرایندهای‌تغییرشکل در بالای دمای‌تبلورمجدد صورت گیرند، فرایندهای گرمکاری نامیده می‌شوند. دراین‌دماهای بالا، فلز باهمان‌سرعتی‌که تغییرشکل پیدا می‌کند تابکاری می‌شود؛ بنابراین سخت‌شدن کرنشی درآن دیده نمی‌شود.

شرایط کاربرد فلزات ممکن است موجب خزش در دماهـای بالا شود، یـا در اثر بارگذاری چرخه‌ای‌خستگی به‌وجود آید. درصورتی‌که‌تغییرشکل پلاستیکی وجود نداشته باشد شکست تـرد است. اگر شکست بـاصرف انرژی و تغییرشکل پلاستیکی همراه باشد انعطاف‌پذیر است. تابش نوترون موجب به‌وجود آمدن عیوب نقطه‌ای درمـواد می‌شود و بنابراین‌خواص را تغییرمی‌دهد. ماده معمولا‌سخت‌تر، پراستحکامتر و تردتر می‌شود. عوامل مختلف ذکر شده دراین پاراگراف را باید برای تعیین فلزاتی‌کـه درموارد مختلف به‌کار می‌روند و ساختارهای مختلف، مدنظر قرار داد.

## سؤالات تشریحی

۱. چرا نسبت ویدمان ـ فرانتس برای مواد غیرفلزی به‌کار نمی‌رود؟
۲. فرق بین شکل‌دانه وجهتگیری دانه را درمواد تك‌فاز بنویسید.

۳. چرا رسانندگی آلیاژ مس و نیکل از رسانندگی تك‌تك این فلزات کمتر است؟

□ ۴. فرایندهای مکانیکی شکل‌دادن شکلهای ۶-۲-۲ و ۶-۲-۳ را باهم مقایسه کنید. کدامیك از آنها فلز را یکنواخت‌تر شکل می‌دهند؟ یکنواختی کدامیك کمتر است.

۵. فرق بین سه‌مدول‌کشسانی را ذکر کنید.

۶. معمولا تنش استحکام تسلیم را پس‌از کرنش ۰٫۲٪ افست درنظر می‌گیریم [شکل ۱-۲-۱ (ج)]. براساس شکل ۶-۳-۴ چرا این‌کار لازم است؟

۷. فرض‌کنیدماده‌ای در اثرکشش تغییرشکل کشسان‌می‌یابد بدون آنکه تغییری درحجم پیدا شود یعنی، $1 = (1+e_x)(1+e_y)(1+e_z)$. نسبت پواسون را حساب‌کنید.

۸. عناصر آلیاژی روی مدول‌کشسانی فقط‌کمی اثر می‌گذارند یا اصلا اثرنمی‌گذارند. (به‌مس و برنج درپیوست (ج) رجوع کنید) ولی براستحکام فلز اثر بسیاری دارند (شکل ۶-۱-۲). دلایل این اختلاف را شرح دهید.

۹. ترکیب‌زوایای $\lambda$ و $\phi$ چه باشد (رابطهٔ ۶-۴-۱) که تنش برشی تفکیك شده بیشترین مقدار را داشته باشد؟

۱۰. فرق بین تنش برشی تفکیك شده و تنش‌برشی بحرانی را بنویسید.

۱۱. آلیاژهای روی و منیزیم بیشتر به‌صورت ریخته شده استفاده می‌شوند تا به صورت کارشده (تغییرشکل پلاستیکی یافته). دلیل موجهی ذکر کنید.

۱۲. چرا آلیاژهای مس و نیکل از تك‌تك این‌فلزات پراستحکامترند؟

۱۳. اتم ناخالصی مانع حرکت نابجایی می‌شود. دراین باره شرح دهید.

۱۴. میله‌ای از میان قالبی درحالت سردکشیده می‌شود تا به‌دو برابر طول اولیهٔ خود برسد. چرا انعطاف‌پذیری آن کاهش‌می‌یابد؟ چه‌مقدار سردکاری‌شده است؟ آیا درصد کاهش‌سطح مقطع آن افزایش‌یافته یا کم شده است؟ (این سؤال به‌منظور مرورتفاوت بین افزایش طول به عنوان فرایند و ازدیاد طول به‌عنوان یك خاصیت و بین کم‌شدن سطح مقطع حاصل ازکارسرد و کاهش سطح مقطع به‌عنوان یك‌خاصیت طرح شده است.)

۱۵. با استفاده از داده‌های شکلهای ۶-۱-۲ (ب)، ۶-۵-۶، و ۶-۵-۷، منحنی احتمالی استحکام تسلیم برحسب کارسرد را برای برنج ۳۰-۷۰ رسم کنید.

۱۶. چگونه زمان طولانیتر (بیشتراز یك‌ساعت) روی منحنیهای شکل ۶-۶-۴ اثر می‌گذارد؟ تفاوت این منحنیها با منحنیهای مربوط به‌برنج ۱۵-۸۵ چیست؟

۱۷. ممکن است به‌عنوان قانون کلی دمای تبلور مجدد را نصف‌دمای ذوب درنظر گیریم. چرا این قانون باید با احتیاط به‌کار گرفته شود.

۱۸. فرق بین‌سردکاری و گرمکاری‌قلع را بنویسید. برای تنگستن نیز تفاوت را ذکرکنید.

□ ۱۹. اساس مراحل مختلف خزش را که درشکل ۶-۷-۹ دیده می‌شود، شرح دهید.

۲۰. چگونه این حقیقت‌که وقتی اتم با دانه‌ای که سطح محدب دارد همسایه شود انرژی کمتری دارد، موجب حرکت مرزدانه می‌شود.

۲۱. شرح دهید که چرا فلز تك‌بلور نرمتر و در نتیجه پلاستیکی‌تر از فلز چند بلوری است.
۲۲. در دماهای بالاتر، دانه‌ها اندازهٔ متوسط خود را افزایش می‌دهند. چرا در دماهای پایینتر اندازه آنها کم نمی‌شود؟
۲۳. چرا مواد درشت دانه در دمای بالا نسبت به‌مواد ریزدانه استحکام بیشتری دارند؟
□ ۲۴. اگر سایر موارد یکسان باشد کدامیك سرعت خزش کمتری دارد: الف) فولادی که در تنش کششی بالا و دمای پایین مورد استفاده قرار گرفته است؛ ب) فولادی که در تنش کششی پایین و دمای بالا به‌کار رفته است؛ ج) فولادی که در تنش کششی پایین و دمای پایین استفاده شده است؟ چرا؟
□ ۲۵. مثالهایی ذکر کنید در مورد اینکه درکجا از شکست انعطاف‌پذیر می‌توان در طرحی که «خطر شکست در آن وجود نداشته باشد»، استفاده کرد.
□ ۲۶. درطراحی کشتیهایی که با پیچ‌ومهره ساخته می‌شوند در مقایسه باطراحی کشتیهایی که باجوشکاری ساخته می‌شوند به‌دمای انتقال اهمیت کمتری داده می‌شود. چرا؟

## مسائل

۶–۱–۱ براساس شکل ۶–۱–۲، مقاومت الکتریکی برنج ۳۰–۷۰ تابکاری شده چقدر است؟

جواب: $۶۲ \times ۱۰^{-۹} \Omega \cdot m$ (یا $۶۲ \Omega \cdot nm$)

۶–۱–۲ بامراجعه به‌شکل ۶–۱–۲، آیا از همان نسبت W–F می‌توان برای برنج نیز مانند فلزات خالص استفاده کرد؟

۶–۱–۳ اگر مانند مثال ۶–۱–۲، نسبت W–F متناسب با دما باشد، رسانندگی گرمایی مس را در $۹۵ \,^{\circ}C$ تخمین بزنید.

جواب: $۴۰۰ \, (W/m^۲)/(^{\circ}C/m)$ [یا $۰٫۴۰ (W/mm^۲)/(^{\circ}C/mm)$]

۶–۱–۴ سیمی مسی دارای‌مقاومت $۰٫۵ \, \Omega$ در هر ۱۰۰ متراست. استفاده ازسیم برنجی ۲۵–۷۵ به‌جای مس مورد توجه قرار گرفته‌است. اگرسیم برنجی همان اندازه‌را داشته باشد، مقاومت آن چقدر است؟

۶–۱–۵ آلیاژ برنج درموردی به‌کار رفته است که استحکام کششی بیش‌از ۲۷۵ MPa و مقاومت ویژهٔ الکتریکی کمتراز $۵۰ \times ۱۰^{-۹} \Omega \cdot m$ (مقاومت ویژهٔ مس برابر است با $۱۷ \times ۱۰^{-۹} \Omega \cdot m$) است. برنج چند درصد روی می‌تواند داشته باشد؟

جواب: ۱۵ تا ۲۳٪ روی

۶–۱–۶ آلیاژی‌از مس (برنج، یا Cu–Ni) موردنیاز است که استحکام کششی آن‌حداقل

۲۴۵ MPa و مقاومت ویژه آن کمتراز $40 \times 10^{-9} \Omega . m$ باشد. الف) آلیاژ مناسب را با درنظر گرفتن اینکه Zn قیمت > Cu قیمت > Ni است، انتخاب کنید؛ ب) انعطاف پذیری آلیاژی که انتخاب کرده‌اید چقدر است؟

۶-۱-۷ برای کاربرد معینی به‌فلزی نیاز داریم که استحکام تسلیم آن بیشتراز ۱۰۰ MPa و رسانندگی گرمایی آن بیشتراز$(W/mm^2)/(°C/mm)$ ۰٫۰۴ باشد. برنج تابکاری شده یا آلیاژ Cu-Ni تابکاری شده‌ای را معین کنید که بتواند دراین‌مورد استفاده شود.

جواب: از ۸۰ Cu-۲۰ Ni استفاده کنید.

۶-۱-۸ قایقی‌موتوری نیاز به‌محل‌نشستن دارد. ازآهن‌نمی‌توان استفاده کرد زیرا زنگ می‌زند. مناسبترین آلیاژ را با استفاده ازشکلهای ۶-۱-۲ و ۶-۱-۳ انتخاب کنید. مادهٔ مورد لزوم باید دارای استحکام کششی حداقل ۳۱۰ MPa؛ انعطاف پذیری حداقل ۴۵٪ ازدیادطول(در ۵۰ mm)؛ وقیمت کم باشد.(یادآوری‌می‌شودکه‌روی‌ازمس‌ارزانتراست.)

**۶-۱-۹** سیمی برنجی باید بار ۴۵ N را بدون تسلیم شدن تحمل کند و مقاومتی کمتراز ۰٫۰۳۳ Ω/m داشته باشد. الف) اگر سیم از برنج ۴۰-۶۰ ساخته شده باشد کوچکترین سیمی که می‌تواند به‌کار رود کدام است؟ ب) درصورتی‌که از برنج ۲۰-۸۰ باشد چطور؟ برای Cu٪۱۰۰ کدام است؟

جواب: الف) قطر ۱٫۸ mm؛ ب) قطر ۱٫۴ mm؛ ج) قطر ۱٫۲mm.

۶-۲-۱ دومیلهٔ آلومینیمی به‌طول ۲۰m هرکدام ۱۴٫۰ mm قطر دارد. یکی ازمیله‌ها ازمیان قالب ۱۲٫۷m کشیده شده‌است. الف) ابعادجدید آن میله چقدر است؟ ب) فرض کنید ازهر میله نمونه‌های آزمایشی مشابهی ساخته شده (تغییرشکل یافته و نیافته) و روی آنها سنجهٔ طولی به‌اندازهٔ ۵۰ mm علامتگذاری شده است. کدامیك از میله‌ها انعطاف‌پذیری بیشتری دارد؟ کدامیك استحکام بیشتری دارد؟

جواب: الف) ۲۴٫۳ m؛ ب) بخش ۱-۲ را مرور کنید.

۶-۲-۲ میزان‌کربن فولاد مذابی به‌وزن ۲۲۵۰۰۰ kg باید با اکسیدکردن آن وتولید CO از ۳ w/o به ۰٫۲۵ w/o کاهش یابد. هرمول گاز تحت شرایط استاندارد ۰٫۰۲۲۴ $m^3$ را اشغال می‌کند. از فرایند تصفیه چه‌مقدار گاز حاصل می‌شود؟

۶-۳-۱ تغییرحجم میله‌ای‌برنجی را وقتی که توسط نیروی MPa ۲۳۳ درجهت محوری بارگذاری می‌شود حساب کنید. استحکام‌تسلیم آن MPa ۲۷۰ ونسبت‌پواسون آن۰٫۳ است.

جواب: ۰٫۰۸۵ v/o

۶-۳-۲ مدول‌کشیدگی برنج درمسئلهٔ قبل چقدر است؟

۶-۳-۳ میله‌ای به‌قطر ۱۲٫۸۳ mm باسنجهٔ طول ۵۰ mm تحت‌بار ۱۵۶ kN قرار گرفته و در حد کشسان ۰٫۳۵۶ mm کشیده شده است. قطر آن تحت‌بار، ۱۲٫۸۰ mm است. الف) مدول کشیدگی میله چقدر است؟ ب) مدول برشی آن چقدر است؟

جواب: الف) تقریباً $۱٫۵ \times ۱۰^{۵}$ MPa؛ ب) $۶۵ \times ۱۰^{۳}$ MPa.

۶-۳-۴ مسی که مدول کشسانی ۱۱۰۰۰۰ MPa و نسبت پواسون ۰٫۳ دارد تحت‌فشار هیدروستاتیکی ۸۳ MPa قرار گرفته است. ابعاد سلول واحد آن چقدر است؟

۶-۳-۵ اگر تنش محوری مس ۹۷ MPa باشد، بالاترین تنش نقطه‌ای در میلهٔ مسی چند بلوری چقدر است؟

جواب: ۱۷۰ MPa

۶-۳-۶ مکعبی از آلیاژ آلومینیم که به دقت سنگ‌زده شده است $(۱۰۰\ mm)^۳$، در جهت $x$ تحت‌فشار بار ۷۰ MPa قرار می‌گیرد. الف) اگر نسبت پواسون ۰٫۳ باشد ابعاد جدید آن چقدر است؟ ب) بار فشاری ثانویه‌ای به‌اندازهٔ ۷۰ MPa در جهت $y$ به‌همراه اولی اعمال می‌شود. در این‌صورت ابعاد چقدر است؟ ج) رابطه (۶-۳-۶) را به‌دست‌آورید. (توجه: مکعب را تحت تنش $s_x = s_y = s_z = P_h$ درنظر بگیرید و به‌یاد داشته باشد که $...+ ۱ + ۳e = (۱ + \Delta l/l)^۳ = (۱ + \Delta V/V)$.)

۶-۳-۷ اگر آهن به‌وسیلهٔ بار هیدروستاتیکی ۲۰۵ MPa تحت‌فشار قرار گیرد، حجم آن به‌اندازهٔ ۰٫۱۳٪ تغییرمی‌کند. اگر تحت تنش محوری ۴۱۵ MPa قرار گیرد تغییر حجم آن چقدر خواهد بود؟

جواب: ۰٫۰۹ v/o

۶-۴-۱ نیروی ۶۶۰ N درجهت [۱۱۱] بلور مکعبی اعمال می‌شود. نیروی تفکیك‌شده درجهت [۱۱۰] چقدر است؟

جواب: ۵۴۰ N

۶-۴-۲ چه‌نیرویی باید درجهت [۱۱۲] به‌مس وارد شود تا نیروی تفکیك شدهٔ آن در جهت [۱۱۰]، ۴۱۰N شود؟

۶-۴-۳ نیرویی برابر ۳۸۰۰ N درجهت [۱۱۱] به‌قلع وارد آمده است نیروی تفکیك شدهٔ آن در جهت [۱۱۰] چقدر است؟ (قلع bcc است و در آن $a = ۰٫۵۸۲۰$ nm و $c = ۰٫۳۱۷۵$ nm).

جواب: ۳۵۵۰ N

۶-۴-۴ تنش محوری ۱۲۳ MPa درجهت [۱۱۰] آهن bcc وجود دارد. تنش‌برشی

تفکیک‌شدهٔ آن درجهت [۱۰۱] روی صفحهٔ (۰۱۰) چقدر است؟

جواب: ۴۳٫۵ MPa

۶–۴–۵ باور آلـومینیم روی صفحهٔ (۱۱۱) و در جهت [۱$\bar{1}$۰]، با ۳٫۵ MPa تنش اعمال شده در جهت [۱$\bar{1}$۱] می‌لغزد. تنش برشی تفکیک شدهٔ بحرانی چقدر است؟

جواب: ۰٫۹۵ MPa

۶–۴–۶ تك‌بلوری کاملا درعرض سیم‌مسی (به‌قطر ۱٫۰ mm) کشیده شده‌ای قرار دارد. بار کششی، برابر ۱ kg، درجهت طولی‌سیم وبسیارنزدیك به‌جهت [$\bar{1}$۰۱] اعمال‌شده‌است. الف) تنش‌محوری روی صفحه‌ای که به‌طور مستقیم ازعرض سیم مـی‌گذرد چقدر است؟ ب) تنش‌برشی درجهت [$\bar{1}$۱۰] روی صفحهٔ ($\bar{1}$۱۱) چقدر است؟

۶–۴–۷ بامراجعه به‌مثال ۳–۷–۳، الف) اگر روی‌صفحات {۱۰۰} سرب، ۸٫۲ × ۱۰^۱۲ اتم در هرمیلی‌متر مربع وجـود داشته باشد، صفحات مجاور چقدر بـاهم فاصله دارنـد؟ ب) اگر روی‌صفحات {۱۱۱} سرب ۹٫۴ × ۱۰^۱۲ اتم در هرمیلی‌متر مربع وجود داشته باشد، صفحات مجاور چقدر بـاهم فاصله دارند؟ بدون درنظر گرفتن شکل هندسی سلول واحد و از طریق اتم برمیلی‌متر مـربع مسئله را حل‌کنید. ج) درچه مجموعه‌ای، انتظار می‌رود لغزش ساده‌تر صورت گیرد؟

جواب: الف) ۰٫۲۴۸ nm؛ ب) ۰٫۲۸۵ nm.

۶–۴–۸ دوازده سیستم لغزش {۱۰۱} ⟨$\bar{1}$۱۱⟩ در فلز bcc کـدام است؟ دوازده سیستم لغزش {۲۱۱} ⟨$\bar{1}$۱۱⟩ کدام است؟

□ ۶–۴–۹ بامراجعه به‌شکل ۶–۴–۸، کوتاهترین بردار لغزشی‌روی‌صفحهٔ {۱۱۱}، $\mathbf{b}_{01\bar{1}}$ (یا جابگشتهای آن مثل $\mathbf{b}_{10\bar{1}}$) است. دومین بردار ازنظرکوتاهی $\mathbf{b}_{11\bar{2}}$ (یـا جابگشتهای آن) است. الف) بـدون درنظر گـرفتن جهات این بردارهـای لغزش کـدام جهت شامل کوتاهترین بردار لغزش بعدی‌است؟ ب) انرژی نسبی لازم برای‌آن چگونه با $\mathbf{b}_{01\bar{1}}$ مقایسه می‌شود؟

جواب: الف) $\mathbf{b}_{\bar{2}21}$؛ ب) ۷ ×.

۶–۴–۱۰ اگر دوطرف صفحهٔ تختی از برنج اختلاف دمایی برابر ۱۲۵ °C داشته‌باشد، بـاید بیشتر از ۲٫۷ cal/mm²·sec (یا ۱۱٫۳ W/mm²) را هدایت کند. همچنین باید حـاصلضرب استحکام کششی در ضخامت آن بیشتر از ۰٫۵۵ MPa (m) باشد یعنی $(S_T)(t) >$ ۰٫۵۵ MPa (m). بـرنجهـای ۱۰–۹۰، ۲۰–۸۰، و ۳۰–۷۰ در شکل ۶–۱–۲ را درنظربگیرید و آلیاژی را که با کمترین‌قیمت، نیازهای‌موجود را برآورده می‌کند انتخاب کنید.

۶ـ۵ـ۱ چه‌مقدار کارسرد روی میلهٔ آلومینیمی در مسئلهٔ ۶ـ۲ـ۱ اعمال شده است؟

جواب: ۱۸٪

۶ـ۵ـ۲ فلز موجود در مسئلهٔ ۶ـ۲ـ۱ را از آلومینیم به‌مس تبدیل کنید. استحکام کششی و انعطاف‌پذیری فلز تغییرشکل یافته چقدر است؟

۶ـ۵ـ۳ سیمی مسی به‌قطر ۲٫۵ mm قبل‌از کشیدن درحالت سرد از میان قالبی به‌قطر ۲٫۰ mm تابکاری شده‌است. استحکام‌کششی سیم پس‌ازکشیدن درحالت‌سرد چقدر است؟

جواب: ۳۳۰ MPa

۶ـ۵ـ۴ ورقی از آهن خالص به‌ضخامت ۲٫۵ mm قبل‌از نورد سرد، تابکاری شده است. این‌ورق تا ۲٫۰ mm ضخامت نوردشده و تغییر عرض‌آن قابل اغماض است. انعطاف‌پذیری آهن پس‌از نورد سرد چقدر خواهد بود؟

۶ـ۵ـ۵ فلز مسئلهٔ ۶ـ۲ـ۱ را با ۸۰ Cu–۲۰ Zn عوض‌کنید. انعطاف‌پذیری دو میله چقدر است؟

جواب: تابکاری شده ــ ۵۰٪ ازیاد طول؛ ۱۸٪ کارسرد ــ ۲۰٪ ازدیاد طول.

۶ـ۵ـ۶ مسی به‌صورت سیمی باحداقل ۳۱۰ MPa استحکام‌کششی و حداقل ۱۸٪ ازدیاد طول (۵۰ mm) به‌کار رفته است. چه‌مقدار کار سرد روی مس انجام شده است؟

۶ـ۵ـ۷ آهنی‌باید دارای سختی برینل حداقل ۱۲۵ و ازدیاد طول‌حداقل ۳۲٪(۵۰ mm) شود. چه مقدار کار سرد روی آهن لازم است؟

جواب: از ۲۵٪ کارسرد استفاده کنید.

۶ـ۵ـ۸ الف) چه مقدار روی باید در برنج سرد کاری شده وجود داشته باشد تا انعطاف‌پذیری آن به‌حداقل ۲۰٪ ازدیاد طول و سختی آن حداقل به $R_B$ ۷۰ برسد؟ ب) چه‌مقدار باید سرد کاری شود؟ (جواب نباید از ۳۶٪ روی بیشتر باشد زیرا فرایند آن پیچیده می‌شود.)

۶ـ۶ـ۱ سیمی مسی‌باید قطری برابر ۰٫۷ mm داشته باشد و استحکام کششی‌آن ۳۴۵MPa باشد. این‌سیم ازمیله‌ای‌مسی به‌قطر ۱۰ mm ساخته می‌شود. قبل‌از سردکاری نهایی قطر میله برای تابکاری چقدر باید باشد؟

جواب: ۰٫۹۵ mm

۶ـ۶ـ۲ میل گردی از آلیاژ ۸۵ Cu–۱۵ Zn به‌قطر ۵ mm در حالت سرد به‌قطر ۱٫۲۵ mm رسانده شده است. اگر بخواهیم استحکام کششی نهایی ۴۱۵ MPa (یا بیشتر) به‌همراه انعطاف‌پذیری نهایی باحداقل ۱۰٪ ازدیاد طول (درسنجهٔ طول ۵۰mm)

بەدست آید، چە روشی را پیشنهاد می کنید؟

۶-۶-۳ سیمی از برنج ۳۰-۷۰ (شکل ۶-۵-۶) بـا استحکام کششی بیش‌از ۴۱۵ MPa، سختی کمتراز ۷۵ $R_B$، و ازدیاد طول (۵۰ mm) بیش‌از ۲۵٪ توسط کشیدن در حـالت سرد ساخته می‌شود. قطر اولیه ۲٫۵ mm است. قطر محصول نهایی باید ۱٫۰ mm باشد. روش بەدست آوردن این مشخصات را توضیح دهید.

جواب: ۱۵٪ تا ۱۹٪ کـارسرد؛ بنابراین باید هنگامی که قطر آن ۱٫۱ mm است قبل‌از ۱۷٪ کار سرد نهایی، تابکاری شود.

۶-۶-۴ میل‌گـردی برنجی (۱۵٪ Zn و ۸۵٪ Cu)، بەقطر ۵ mm باید در حالت سرد کشیده شود تا سیمی بەقطر ۲٫۵ mm بەدست آید. درصورتی کـه بخواهیم سختی سیم ۷۲ $R_B$، استحکام کششی بیشتراز ۴۱۵ MPa و انعطاف‌پذیری بیشتراز ۱۰٪ ازدیـاد طول درسنجهٔ طول استاندارد باشد، روشی را برای فرایندکشش مشخص کنید.

۶-۶-۵ ورق نـورد شده‌ای از برنج ۶۶ Cu-۳۴ Zn بـەضخامت ۱۲٫۷ mm هنگام دریافت ازتولیدکننده‌دارای انعطاف‌پذیری برابر ۲٪ ازدیاد طول (در ۵۰mm سنجهٔ طول) است. این ورق‌را می‌خواهیم پس‌ازنورد بەضخامت ۳٫۲ mm برسانیم. دراین شکل نهایی، استحکام کششی فلز باید حداقل ۴۸۳ MPa، و انعطاف‌پذیری آن حداقل ۷٪ ازدیاد طول (در ۵۰ mm سنجهٔ طول) بـاشد. فرض کنید فرایند نوردی‌کـه ضخامت ورق را کاهش می‌دهد عرض را تغییر ندهد. تمام مراحل لازم را (با ذکر دمـا، زمـان، ضخامت و . . .) مشخص کنید.

۶-۶-۶ ورقی آلومینیمی توسط ورقکاری چرخشی بەصورت قالب‌کیکی تغییرشکل داده است (شکل ۶-۲-۳). فرض‌کنید داده‌های شکل ۶-۶-۳ در مورد این آلومینیم سردکاری شده نیز صحت دارد. آیا در فر ۱۸۰ °C (۳۵۰ °F) کـه برای پخت‌کیك بەکار می‌رود این آلومینیم‌شروع بەتبلورمجدد می‌کند؟ این‌مسئله را هم با استفاده ازشکل و هم بەصورت ریاضی حل کنید.

۶-۶-۷ فرض‌کنید تـابکاری در یـك‌ثانیه کامل شود تـا امکان گرمکاری آلومینیم شکل مسئلهٔ مثال ۶-۶-۲ وجود داشته باشد. چە دمایی لازم است؟

جواب: ۶۸۵ K (یا ۴۱۲ °C)

□ ۶-۷-۱ داده‌هـای زیر از آزمایش شکست ناشی از خزش در فلز اینکونل «X» در ۸۱۵ °C (۱۵۰۰ °F) بەدست آمده‌است: الف) ۱٪ کرنش‌پس‌از ۱۰ ساعت؛ ب) ۲٪ کرنش پس‌از ۲۰۰ ساعت؛ ج) ۴٪ کرنش پس‌از ۲۰۰۰ ساعت؛ د) ۶٪ کـرنش پس‌از ۴۰۰۰ ساعت؛ ه) گلویی‌پس‌از ۵۰۰۰ ساعت‌بەوجود می‌آید وفلز پس‌از ۵۵۰۰ ساعت می‌شکند. سرعت خزش چقدر بوده است؟

جواب: ۰ر۰۰۱٪ درساعت

☐ ۶-۷-۲ برای طراحی یك لولهٔ تحت فشار باید تحمل کرنش ۳I/O در مدت یك‌سال درنظر گرفته شود. بیشینهٔ سرعت خزش را برحسب ارقام درصد درساعت معین‌کنید.

☐ ۶-۸-۱ گاهی فرض می‌شودکه اگر در آزمایش خستگی پس‌از $۱۰^{۸}$ چرخه شکست به‌وجود نیاید، تنش زیرحـد دوام است. دستگاهی‌کـه برای آزمایش به‌کار رفته مستقیماً به‌موتور الکتریکی با ۱۷۴۰ دور دردقیقه متصل شده است، چه‌مدتی طول می‌کشد تا این تعداد چرخه اعمال شود؟

جواب: ۴۰ روز

☐ ۶-۸-۲ میل‌لنگ‌اتومبیلی‌را آزمایش کنید. جنبه‌های مختلف‌طراحی را که‌تغییردهندهٔ مقاومت در برابر خستگی‌اند، ذکرکنید.



# فازهای مولکولی

## چشم‌انداز فصل

«پلاستیکها» از نظر فنی به‌سرعت اهمیت یافته‌اند. سبک‌وزنی، بزرگترین مزیت آنهاست؛ و نیز به‌راحتی و با کمترین زحمت به‌شکلهای هندسی پیچیده در می‌آیند و خواص مطلوب ازخودنشان می‌دهند. پلاستیکها را می‌توان در ردهٔ موادی که با سرعت، سرسام‌آوری کاربرد صنعتی یافته‌اند. به‌شمار آورد. چون به‌آسانی تولید می‌شوند، طراحان اغلب بدون اطلاع کافی ازمشخصات و محدودیتهای مصرفشان ازآنها استفاده مـی‌کنند. هدف این فصل بررسی ساختار این مـواد غیرفلزی و ارتباط‌دادن این ساختارها به‌خواص و رفتارشان درهنگام کار است.

نام‌صنعتی «پلاستیکها»، پلی‌مراست، که شامل مولکولهای بزرگ یاماکرو-مولکول‌اند و هرمولکول از تعدادی واحد تکراری یا مر تشکیل شده است. در این‌فصل مرها را مطالعه می‌کنیم و چگونگی ترکیب آنها و تولید مواد پلی‌مری را بررسی خواهیم کرد. برای این‌کارنخست، به‌آرایشهای مولکولی ایدئال نظری می‌افکنیم و بعد همان‌طورکه در مورد بلورها مطرح کردیم بی‌نظمیها را که اثر

قابل‌ملاحظه‌ای روی رفتار پلی‌مر دارند بررسی خواهیم کرد.

پلی‌مرها به‌آسانی متبلور نمی‌شوند، زیرا به جای اتمهای تنها، مولکولهای بزرگ باید به‌صورت یك‌ساختار منظم آرایش یابند. به‌علاوه مولکولها پیوندهای بین مولکولی نسبتاً ضعیفی دارند. همچنین مواد پلی‌مری چون الکترون آزاد ندارند عایق‌اند.

با توجه به‌عواملی که در پاراگراف قبل متذکر شدیم نتیجه می‌گیریم که خواص و رفتار پلاستیکها از جنبه‌های بسیاری با فلزات تفاوت دارد.

## هدف از مطالعه

۱. آشناشدن با مولکولها که مقدمه‌ای است برای آشنایی با پلی‌مرها.

۲. محاسبهٔ اندازهٔ مولکولی، و تشریح تغییرات پیوندی در واکنشهای پلی‌مر شدن.

۳. آشناشدن با بی‌نظمیهای مولکولی که الف) روی ترتیب مولکولی وتبلور پلی‌مرهای خطی اثر می‌گذارند و ب) موجب بسط ساختارهای سه‌بعدی می‌شوند.

۴. تفسیر خواص ویسکوالاستیك‌ودی‌الکتریك برحسب واکنشهای مولکولی، بالا و زیر دمای شیشه‌ای.

۵. پیشبینی از هم پاشیدگی، که ممکن است در بعضی محیطهایی که در عمل درآن قرار می‌گیرند رخ دهد.

۶. توانایی طراحی محصولات در درسهای آیندهٔ دانشگاهی، یا در شغل آیندهٔ خود، و ابلاغ هوشیارانهٔ مشخصات مهندسی مورد نظر خود به‌مهندس طراح تا او مواد بهینه را برگزیند.

## ۷-۱ مولکولهای بزرگ

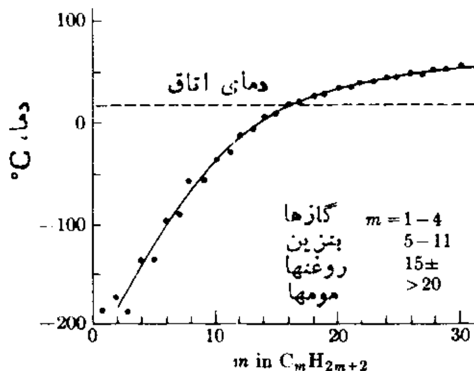
پس از فلزات دستهٔ دیگری از مواد را بررسی می‌کنیم که جامدات مولکولی نام دارند. این ترکیبات غیرفلزی‌اند (بخش ۷-۲) و معمولاً از مواد آلی خام سرچشمه می‌گیرند. مواد آلی ازنخستین موادی‌اندکه در مهندسی به‌کار می‌رفته‌اند. استفاده از چوب به‌عنوان مادهٔ ساختمانی، وسایرموادطبیعی آلی مانند چرم برای واشر، نمد برای‌آب‌بندی، چوب‌پنبه برای عایقکاری، الیاف برای اتصال، روغن برای روغنکاری، و رزین‌ها به‌عنوان روکش محافظ رواج زیادی دارد.

از نخستین روزهایی که مواد آلی به‌کار رفته‌اند برای بهبود خواص مهندسی آنها کوشش شده است. مثلا خواص چوب در جهات مختلف فرق می‌کند و استحکام آن به‌موازات دانه‌ها چندبرابر بیشتر از جهت عمود بر آنهاست. برای رفع این نایکنواختی چوب چندلا به‌وجودآمده است و اگر منافذ چوب را با رزین گرما سخت پر کنند خواص فیزیکی بهتری به‌دست خواهد آمد.

قوهٔ ابتکار تکنولوژیست‌ها درکار بامواد آلی، به‌بهبود موادآلی طبیعی محدود نشده است بلکه اجسام مصنوعی بسیاری نیز به‌وجود آمده است. مثلا پلاستیکها یا به‌بیان‌دقیقتر پلی‌مرها* انواع‌بسیار زیادتری از مواد را برای‌کاربردهای مهندسی ارائه‌کرده‌اند. برای گسترش کاربرد چنین موادی گامهای بزرگی برداشته شده و تلاش روزافزونی در جریان است.

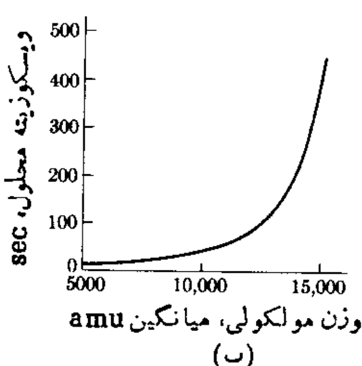
مهندسی‌که با پلی‌مرها سروکار دارد چه بامواد آلی طبیعی کارکند و چه باموادآلی مصنوعی، ابتدا لازم‌است ماهیت ومشخصات مولکولهای بزرگ را بشناسند. درمواد طبیعی مولکولهای‌بزرگ راطبیعت «می‌سازد»؛ درموادمصنوعی این ماکرومولکولها توسط اتصال عمدی، مولکولهای کوچک به‌وجود می‌آیند.

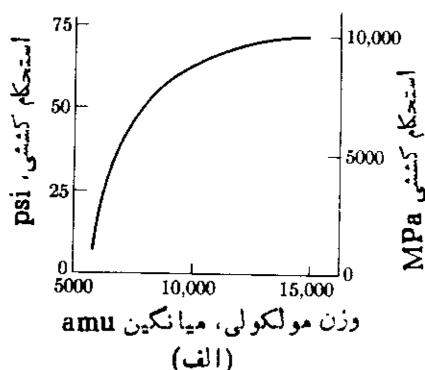
**اندازهٔ مولکولی.** قبلا درشیمی دیده‌ایم که نقطهٔ ذوب تمام هیدروکربنهای $C_mH_{2m+2}$ به‌اندازهٔ مولکول آنها بستگی دارد (شکل ۷-۱-۱). به‌طورکلی پلی‌مرهایی که از مولکولهای بزرگ ساخته شده‌اند محکمتر و در برابر تنشهای مکانیکی وگرمایی از




**شکل ۷-۱-۱** نقطهٔ ذوب هیدروکربنهای سری $C_mH_{2m+2}$ برحسب اندازهٔ مولکول آنها.

* لغت «پلاستیك» در حقیقت «صفت» است و شکل‌پذیر بودن دائمی ماده را بیان می‌کند. اما در اصطلاح متداول، پلاستیکها موادی‌آلی هستند، که باتغییرشکل پلاستیکی تولید شده‌اند.




**شکل ۷-۱-۲** خواص پلی‌مـر برحسب انـدازهٔ آن. (کوپلی مروینیل‌کلریدووینیل استات). الف) استحکام کششی، ب) ویسکوزیته.

پلاستیکهایی کـه مولکولهای کـوچك دارند مقاومترند (شکل ۷-۱-۲). نظیر این نوع رابطه بین اندازهٔ مولکولی وخواص، راهم در پلی‌مرهای مصنوعی مانند پلی‌وینیل کلرید، نایلون، ساران، وهم در موادآلی طبیعی مانند سلولز، لاستیك، موم، و لاك می‌توان یافت.

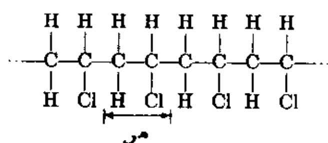
این مواد آلی در ردهٔ پلی‌مرها قرار می‌گیرند زیرا مولکولهایی شامل چندین جزء یا واحد تکراری به‌نام مر هستند. بنابراین برای این مـواد مولکولی واژهٔ فنیتر پلی‌مر را به‌کار خواهیم برد تا مواد را بتوان از نحوهٔ تغییرشکل آنها تشخیص داد.

بیشتر مولکولهای بزرگی کـه دربارهٔ آنها بحث خواهیم‌کرد واحدهـای تکراری کوچکتری به‌نام مر دارند (شکل ۷-۱-۳). بنابراین، جرم مولکول بزرگ یعنی پلی‌مر، حـاصلضرب جرم مر در تعداد مرهای مـولکول است. مثلا اگر مولکول پلی‌وینیل کلرید ۵۰۰ مروینیل‌کلرید، $C_2H_3Cl$ داشته باشد. هریك از آنها

$$۲(۱۲\ amu)+۳(۱\ amu)+۳۵٫۵\ amu=۶۲٫۵\ amu$$

دارد، کل جرم مولکول پلی‌مر (۶۲٫۵ amu) ۵۰۰ یا ۳۱۲۵۰ amu (یا ۳۱۲۵۰ گرم برمول) است.

علاوه برنشان دادن اندازهٔمولکول توسط جرم آن، معمولا از درجهٔ پلی‌مرشدن، $n$، صحبت به‌میان می‌آیدکه تعداد مرها در هرمولکول است.




**شکل ۷-۱-۳** مولکول پلی‌مری(پلی‌وینیل کلرید). مولکول بزرگ از تعداد زیـادی واحدهای تکراری (مرها) تشکیل شده‌است $\left(C_2H_3Cl\right)_n$ (بـه‌شکل ۲-۳-۷ رجوع کنید).

$$n=\frac{\text{جرم مولکولی}}{\text{جرم مر}} \qquad (۷-۱-۱)$$

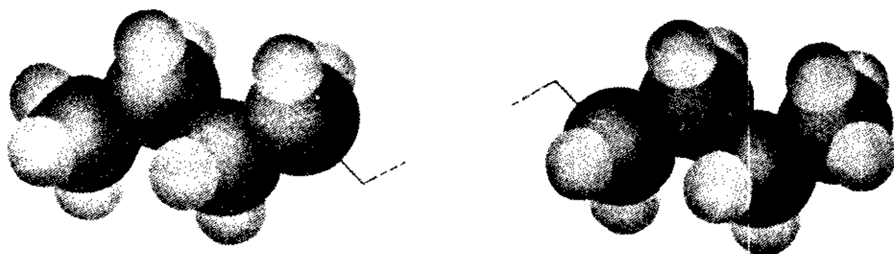
و واحدآن به‌صورت زیربیان می‌شود(amu = واحد جرم اتمی)

$$\frac{\text{مر}}{\text{مولکول}}=\frac{\text{amu/مولکول}}{\text{amu/مر}}$$

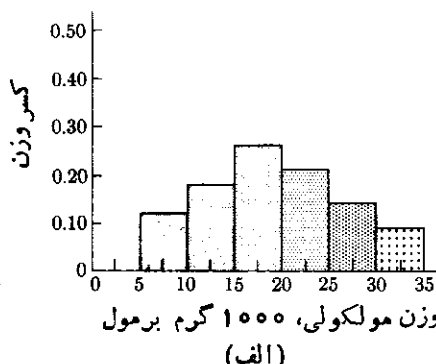
مولکولی را که هم‌اکنون شرح دادیم و دارای جرم amu ۳۱۲۵۰ و درجه پلی‌مر شدن ۵۰۰ بود، درگسترهٔ پلی‌مرهای تجارتی که معمولا بین ۷۵ تا ۱۰۰۰ مر دارند، قرار می‌گیرد. این‌مقادیر چندین‌مـرتبه از مقادیر مربوط به‌مولکولهـای دیگر بزرگترند (شکل ۲-۳-۱). با این حال، گرچه جرم این مولکولها زیاد است ولی خود مولکول کوچکتر از آن است که میکروسکوپ نوری قدرت تشخیص‌آن را داشته باشد و فقط تحت شرایط معینی با میکروسکوپ الکترونی قابل مشاهده است. بنابراین تعیین اندازهٔ مولکولی غالباً به‌طور غیرمستقیم و بـا وسایل اندازه‌گیری ویسکوزیته، فشار اسمزی، یا پراکندگی نور انجام می‌شود که تمام این کمیتها به‌تعداد، اندازه، یـا شکل مولکول در محلول یا تعلیق بستگی دارند [شکل ۷-۱-۲ (ب)].

**توزیع اندازهٔ مولکولی.** در موادی مانند پلی‌اتیلن (شکل ۷-۱-۲) یا پلی‌وینیل‌کلریدکه از اتصال مولکولهای کوچك به‌وجـود می‌آیند، اندازهٔ تمام مـولکولهای بزرگ حاصل یکسان نیست. و همان‌طورکـه انتظار می‌رود بعضی ازآنها بیش‌از سایرین رشد می‌کنند. در نتیجه اندازه مولکولی پلاستیکها گستره‌ای داردکه تااندازه‌ای شبیه به‌مخلوط پروپان، هگزان، اکتان، و سایر هیدروکربنهای پارافینی در نفت‌خـام است. بنابراین برای تعیین یك شاخص اندازهٔ یکتا باید میانگین درجهٔ پلی‌مر شدن را محاسبه‌کرد.

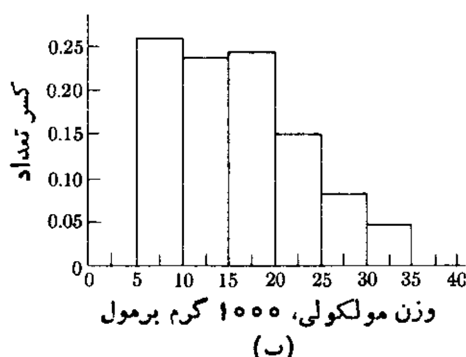
یکی ازروشهای محاسبهٔ میانگین وزن مولکولی [شکل ۷-۱-۵ (الف)] تعیین‌کسر وزنی مولکولهای موجود در هریك از فواصل مختلف اندازه است.



**شکل ۷-۱-۴** پلی‌مر خطی (پلی‌اتیلن). طـول مولکول در مولکولهای مختلف متفاوت‌است، ولی همهٔ آنها صدها اتم‌کربن دارند.



(الف)



(ب)

**شکل ۷-۱-۵** توزیع اندازهٔ پلی‌مـر الف) براساس جرم؛ ب) براساس تعداد. این دوشکل برای یک‌ماده رسم شده‌اند. در(الف) داده‌هـا نشان می‌دهدکه ۱۲٪ کل‌جرم را مولکولهای بین ۵۰۰۰ amu و ۱۰۰۰۰ amu (مقـدار متوسط=۷۵۰۰ amu) تشکیل مـی‌دهند. سایر درصدهای کل جرم در فواصل دیگر قـرار دارند. در (ب) می‌بینیم کـه ۲۶٪ ازکـل تعداد مولکولها در گسترهٔ ۵۰۰۰amu تا ۱۰۰۰۰ amu هستند. این مقدار ۲۶٪در (ب) با ۲۶٪ در (الف) اختلاف دارد زیرا مولکولهای کـوچک بسیاری در ۱۲٪ جرم وجود دارد. درعوض ۴٪ مولکولهادر ۹٪ جرم در فـاصلهٔ ۳۰۰۰۰ــ۳۵۰۰۰ قرار مـی‌گیرند. (مثال ۷ــ۱ــ۳ را ببینید.)

«میانگین جرمی» اندازهٔ مولکولی، $\bar{M}_m$ به‌این ترتیب محاسبه می‌شود

$$\bar{M}_m = \Sigma(W_i M_i) \qquad (۷-۱-۲)^*$$

که درآن $W_i$ کسرجرمی درهریک از اندازه‌ها و $M_i$ مقدار (میانهٔ)آنها درآن فاصله‌است. «میانگین جرمی» اندازهٔ مولکولی بخصوص در بررسی خواصی چون ویسکوزیته اهمیت دارد که درآن جرم یکایک مولکولها مهم است.

روش دیگر تعیین میانگین اندازهٔمولکولی استفاده از کسر تعداد مولکولهای موجود در هریک از فواصل مختلف اندازه [شکل ۷-۱-۵ (ب)] است. خواصی مـانند استحکام [شکل ۷ــ۱ــ۲ (الف)] نسبت به تعداد مـولکولهای بزرگ حساستر از جرم واقعی‌اند. بنابراین اندازهٔ مولکولی «میانگین تعداد» $\bar{M}_n$ اهمیت بسیار دارد

$$\bar{M}_n = \Sigma(X_i M_i) \qquad (۷-۱-۳)^*$$

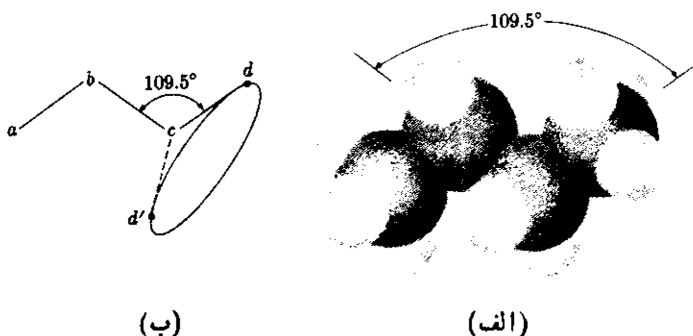
---

* روابط (۷ــ۱ــ۲)و(۷ــ۱ــ۳) حالتهای ویژهٔ رابطهٔ ریاضی میانگین است

$$\text{میانگین} = \Sigma(\text{کسر}_i)(\text{مقدار}_i)$$

دراین‌رابطه $X_i$ کسر تعدادمولکولها درهرفاصله‌ای از اندازه است [شکل ۷ــ۱ــ۵ (ب)]. همان‌طورکــه قبلادیدیم $M_i$ مقدار (میانهٔ) هرفــاصلهٔ انــدازه است. (مثــال ۷ــ۱ــ۳ را ببینید.)

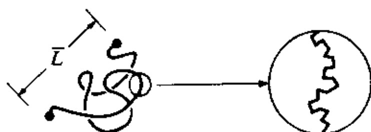
**طول مولکولی.** با استفاده از جدول ۲ــ۳ــ۱ مــی‌توان محاسبه کرد کــه طــول متوسط مولکول‌پلی‌وینیل‌کلرید بادرجهٔ پلی‌مرشدن ۳۰۷ مر (مثال ۷ــ۱ــ۳) ۹۵ nm است. زیرا هر پیوند C–C برابر با ۰٫۱۵۴nm است و دوبرابر تعداد مرها پیوند وجود دارد ولی این محاسبه به تصحیح نیاز دارد، زیرا شکل ۷ــ۱ــ۳ فوق‌العاده ساده شده است.* زاویهٔ پیوند C–C–C ۱۰۸° نیست و برابر با ۱۰۹٫۵° است (شکل ۷ــ۱ــ۴). به‌این ترتیب طول مسیر «دندان‌اره‌ای» برابر با $(95\,nm)\sin 54.7°$ یا ۷۷ nm خواهد بود. مهمتر اینکه پیوندهای یگانه در زنجیرکربن، آزادی چرخش دارند (شکل ۷ــ۱ــ۶)، به‌طوری که اگر فقط سه‌پیوند را درنظر بگیریم طول دو انتهای آنها ازکمتر از ۰٫۳nm، $a\text{–}d'$، تا۰٫۴nm، $a\text{–}d$، متغیر است. همان‌طورکــه آشفتگی گرمایــی زاویــه‌هــای پیوند را می‌چرخاند، طول به‌طور تصادفی بین این دوحد تغییر می‌کند. در نتیجه مولکول فوق با ۳۰۷ مر، اگر شبیه شکل ۷ــ۱ــ۴ باشد می‌تواند طولی برابر ۷۷ nm داشته‌باشد، یااگر دو انتهای مــولکول مجاور هم قرار گیرند می‌تواندکمتر از یك نانومتر باشد. در واقع آشفتگی گرمایی موجب گره‌خوردگی و تغییر مدام مولکول می‌شود (شکل ۷ــ۱ــ۷). ازنظر آماری محتملترین مقدار طول یا ریشه میانگین مربعها، $\bar{L}$، برابر است با $l\sqrt{m}$.




**شکل ۷ــ۱ــ۶** چرخش پیوند (بوتان). با آنکه زاویهٔ پیوند برابر بــا ۱۰۹٫۵° و ثابت است طول دوانتها از $a\text{–}d$ تــا $a\text{–}d'$ تغییر مــی‌کند. مولکولهای بزرگ تغییرات بسیار زیادتری دارند.

---

* ولی هنوز ازاین‌صورت استفاده می‌شود زیرا پاسخگوی بسیاری از نیازهاست.




**شکل ۷-۱-۷** صورتبندی گره‌خورده. چون پیوند C—C می‌تواند بچرخد، (شکل ۷—۱—۶)، مولکولهای بزرگ معمولاً گره می‌خورند و میانگین طول، $\bar{L}$، آنها نسبتاً کوتاه است (رابطهٔ ۷—۱—۴).

$$\bar{L} = l\sqrt{m} \qquad *(۴-۱-۷)$$

در این رابطه $l$ طول پیوند است یعنی ۱۵۴ nm ر۰ برای C—C است (جدول ۲—۳—۱) و $m$ تعداد پیوندهاست. برای پلی‌وینیل‌کلرید (شکل ۷—۱—۳) بـه‌ازای هر مر، دو پیوند وجـود دارد، درنتیجه $m = ۲n$ و طبق رابطهٔ (۷—۱—۴) $\bar{L}$ برای مولکولی بـا ۳۰۷ مر، مساوی ۳٫۸ nm می‌شود.

صورتبندی گره‌خـورده در شکل ۷—۱—۷ از این نظر مهم است کـه کش‌آمدن و انقباض لاستیك براساس آن‌صورت می‌گیرد. این‌شکل همچنین می‌تواند توضیح دهد کـه چرا لاستیك کشیده شده ضریب انبساط گرمایی منفی دارد (بخش ۷—۵).

**مثال ۷-۱-۱** ترکیب تفلون شبیه به‌پلی‌اتیلن در شکل ۲—۳—۷ (ب) است. فقط در آن اتمهـای فلوئور بـه‌جـای اتمهای هیدروژن قرار دارند. بنابراین مر آن $(C_2F_4)$ است. الف) اگر جرم مولکول ۳۳۰۰۰ amu (یـا ۳۳۰۰۰ گرم برمـول) باشد، درجهٔ پلی‌مر شدن چقدر است؟ ب) در هر گرم چه‌تعداد مولکول وجود دارد؟

حل: الف) جرم مر برابر ۱۰۰ amu = (۱۲)(۲) + (۱۹)(۴) است؛

$$\frac{(۳۳۰۰۰\ \text{amu}/\text{مولکول})}{(۱۰۰\ \text{amu}/\text{مر})} = ۳۳۰ \frac{\text{مر}}{\text{مولکول}}$$

ب)

$$\frac{(۰٫۶ \times ۱۰^{۲۴}\ \text{مولکول})}{(۳۳۰۰۰\ \text{g})} = \frac{۱٫۸ \times ۱۰^{۱۹}}{\text{g}}$$

توضیح. مـانند مثال ۲—۳—۱ در مورد اتیلن، مـر را به‌جای $CF_2$، $C_2F_4$ درنظر می‌گیریم. این گروه سه‌اتمی نمی‌تواند مونومر تشکیل دهد، زیرا اگر فقط در اتم فلوئور

---

* این رابطه بـا استفاده از محاسبات آمـاری به‌دست آمـده است و به‌ریاضیات بالاتری نیاز دارد که از حد این کتاب خارج است.

موجود باشد، فقط دوپیوند از چهـار پیوندکربن مورداستفاده قرار گرفته‌اند. بـا تشکیل پیوند دوگانه بین کربنها، $C_2F_4$ می‌تواند پیوند لازم را داشته باشد. ▲

**مثال ۷-۱-۲** محلولی حـاوی ۱۵ g آب، ۴ g اتـانـول ($C_2H_5OH$) و ۱ g قنـد ($C_6H_{12}O_6$) است. الف) کسر جرمی هر جزء مولکـولـی چقدر است؟ ب) کسر تعداد هرجزء مولکولی چقدر است؟

حل:

الف)

| | $W_i$ |
|---|---|
| $H_2O$ | ۱۵ g/۲۰ g = ۰٫۷۵ |
| $C_2H_5OH$ | ۴g/۲۰g = ۰٫۲۰ |
| $C_6H_{12}O_6$ | ۱ g/۲۰ g = ۰٫۰۵ |

ب) مبنا: ۲۰ amu

| | | مولکول | $X_i$ |
|---|---|---|---|
| $H_2O$ | ۱۵ amu/۱۸ amu | = ۰٫۸۳۳ | = ۰٫۹۰۰ |
| $C_2H_5OH$ | ۴ amu/۴۶ amu | = ۰٫۰۸۷ | = ۰٫۰۹۴ |
| $C_6H_{12}O_6$ | ۱ amu/۱۸۰ amu | = ۰٫۰۰۶ | = ۰٫۰۰۶ |
| | | ۰٫۹۲۶ | |

▲

**مثال ۷-۱-۳** می‌دانیم که توزیع اندازهٔ مولکولی پلی‌وینیل کلرید (PVC) طبق شکلهای ۷-۱-۵ (الف) و (ب) است که به‌ترتیب برحسب کسر جرمی و کسر تعدادند. الف) «میانگین جرمی» اندازهٔ مولکولی چقدر است؟ ب) «میانگین عددی» اندازهٔ مولکولی چقدر است؟ ج) درجهٔ پلی‌مر شدن $n$ براساس $M_m$ چقدر است؟

حل: الف) و ب)

| فواصل اندازهٔ مولکولی amu | $(M)_i$، مقدارمتوسط amu | $W_i$ کسر جرمی [شکل ۷-۱-۵ (الف)] | $(W_i)(M_i)$ amu | $X_i$ کسر عددی [شکل ۷-۱-۵ (ب)] | $(X_i)(M_i)$ amu |
|---|---|---|---|---|---|
| ۵-۱۰۰۰۰ | ۷۵۰۰ | ۰٫۱۲ | ۹۰۰ | ۰٫۲۶ | ۱۹۵۰ |
| ۱۰-۱۵۰۰۰ | ۱۲۵۰۰ | ۰٫۱۸ | ۲۲۵۰ | ۰٫۲۳ | ۲۸۷۵ |
| ۱۵-۲۰۰۰۰ | ۱۷۵۰۰ | ۰٫۲۶ | ۴۵۵۰ | ۰٫۲۴ | ۴۲۰۰ |
| ۲۰-۲۵۰۰۰ | ۲۲۵۰۰ | ۰٫۲۱ | ۴۷۲۵ | ۰٫۱۵ | ۳۳۷۵ |
| ۲۵-۳۰۰۰۰ | ۲۷۵۰۰ | ۰٫۱۴ | ۳۸۵۰ | ۰٫۰۸ | ۲۲۰۰ |
| ۳۰-۳۵۰۰۰ | ۳۲۵۰۰ | ۰٫۰۹ | ۲۹۲۵ | ۰٫۰۴ | ۱۳۰۰ |
| | | | $\Sigma=$ ۱۹۲۰۰ amu/مولکول (الف) $M_m$ | | $\Sigma=$ ۱۵۹۰۰ amu/مولکول (ب) $M_n$ |

ج) amu برمر PVC (شکل ۷-۱-۳)

$$(C_2H_3Cl) = ۲۴ + ۳ + ۳۵٫۵ = ۶۲٫۵ \ \frac{amu}{\text{مر}}$$

$$\text{(براساس } \overline{M}_m\text{)} \ \text{درجهٔ پلی‌مرشدن} = \frac{(۱۹۲۰۰ \ amu/\text{مولکول})}{(۶۲٫۵ \ amu/\text{مر})} = ۳۰۷ \ \frac{\text{مر}}{\text{مولکول}}$$

توضیح. هرجا توزیعی از اندازه وجود دارد، اندازهٔ مولکولی «میانگین عددی» همیشه کمتراز مقدار «میانگین جرمی» است زیرا در فواصلی با اندازهٔ کوتاهتر، تعداد مولکولهای کوچکتر درهر گرم زیادتر است، با زیادشدن گسترهٔ توزیع، دو میانگین ازهم فاصله می گیرند. ▲

**مثال ۷-۱-۴** مولکول پلی‌اتیلن $(C_2H_4)_n$ (شکل ۷-۱-۴ را ببینید)، باجرم مولکولی ۲۲۴۰۰ amu در حلال مایعی حل شده است. مطلوب است تعیین الف) بیشترین فاصلهٔ ممکن بین دو اتمهای مولکول پلی‌اتیلن (بدون آنکه زاویهٔ پیوند C—C—C از °۱۰۹٫۵ تغییر کند). ب) کمترین فاصله. ج) فاصله‌ای که احتمالش ازهمه بیشتراست.

حل:

$$\left(\frac{\text{۲۸ amu}}{\text{مر}}\right)\left(\frac{\text{۲۲۴۰۰ amu}}{\text{مولکول}}\right) = \text{درجهٔ پلی‌مرشدن}$$

$$= \text{۸۰۰} \frac{\text{مر}}{\text{مولکول}}$$

بنابراین

$$\text{۱۶۰۰} = \text{پیوندها}$$

از جدول ۲-۳-۱

$$l = \text{۰٫۱۵۴ nm}$$

الف) $\text{۲۰۰ nm} = (\text{۱۶۰۰})(\text{۰٫۱۵۴ nm})(\sin \text{۱۰۹٫۵}^\circ/\text{۲}) =$ طول «مسیر دندان اره‌ای»

ب) درصورت تماس دواتنها $\text{۰٫۳ nm} \sim =$ کمترین فاصله

ج) $L = \text{۰٫۱۵۴ nm}\sqrt{\text{۱۶۰۰}} = \text{۶٫۲ nm}$ : رابطهٔ (۷-۱-۴)

توضیح. از آنجا که مولکول دارای آشفتگی گرمایی مداوم است، بعیداست که طول به ۲۰۰ nm برسد. برای آنکه کشیده شود و به‌آن طول برسد باید نیرویی به‌کار رود، علاوه براین نیروی لازم در دماهای بالاتر بیشتر می‌شود زیرا با افزایش آشفتگی گرمایی گره‌خوردگی پایاتر می‌شود. ▲

## ۷-۲ پلی‌مرهای خطی

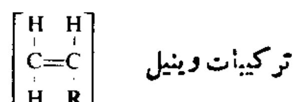
بسیاری از پلی‌مرهای متداول از مولکولهای بزرگ یک‌بعدی تشکیل یافته‌اند. مثلا پلی‌وینیلها را می‌توان نام‌برد که ساختار مر آنها ازاین قرار است



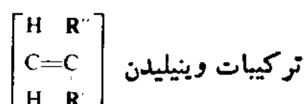
(۷-۲-۱)

(در اینجا R رادیکال متنوعی طبق جدول ۷-۲-۱ است). پلی‌استرها، پلی‌اورتانها و پلی‌آمیدها نیز مولکولهای خطی‌اند. و بالاخره لاستیکها نیز مولکول خطی (و بسیار گره خورده) دارند. سه مر از لاستیکهای ساده‌در جدول ۷-۲-۲ ذکر شده‌است. دونوع واکنش

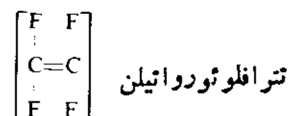
**جدول ۷-۲-۱ مولکولهای نوع وینیل**

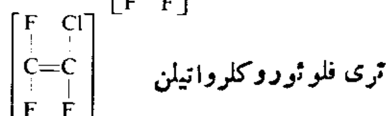
ترکیبات وینیل 

| | R |
|---|---|
| اتیلن | $-H$ |
| وینیل کلرید | $-Cl$ |
| وینیل الکل | $-OH$ |
| پروپیلن | $-CH_3$ |
| وینیل استات | $-OCOCH_3$ |
| اکلریلونیتریل | $-C\equiv N$ |
| استیرن (وینیل بنزن) | $-C_6H_5$ |

ترکیبات وینیلیدن 

| | R′ | R″ |
|---|---|---|
| ایزوبوتیلن | $-CH_3-$ | $-CH_3$ |
| وینیلیدن کلرید | $-Cl$ | $-Cl$ |
| متیل متااکریلیت | $-CH_3-$ | $-COOCH_3$ |

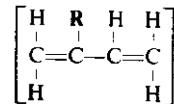
تترافلوئورواتیلن 

تری فلوئوروکلرواتیلن 

---

پلی‌مر شدن را بررسی می‌کنیم که عبارت‌اند از افزایشی و تراکمی. بعداً خواهیم دید که در طول زنجیرهای مولکول خطی، مرها کاملا منظم نیستند و پیکربندیهای گوناگونی دارند.

**جدول ۷-۲-۲ مولکولهای نوع بوتادین**

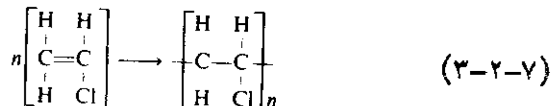


| | R |
|---|---|
| بوتادین | $-H$ |
| کلروپرن | $-Cl$ |
| ایزوپرن | $-CH_3$ |

**پلی‌مرشدن افزایشی.** مونومروینیل $C_2H_3R$ است، یعنی



وینیلها دوعاملی‌اند زیرا از دو انتهای جلو و عقب می‌توانند واکنش انجام دهند. برای پلی‌وینیل‌کلرید که در آن $-R$ در رابطهٔ (۷-۲-۲)، $-Cl$ است این واکنش به‌قرار زیر است



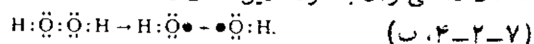
رشد پلی‌مرها را به‌سادگی می‌توان به‌جفت‌شدن واگنهای قطار تشبیه‌کرد، ولی فرایند کار پیچیده است زیرا بادنبال هم‌چیدن مونومرها، واکنش پلی‌مرشدن افزایشی به‌طور خودکار انجام نمی‌شود. واکنش ابتدا باید شروع شود بعدگسترش‌یافته، سپس خاتمه یابد.

شروع‌کنندهٔ واکنش معمولا یك رادیکال آزاد مانند مولکول گستردهٔ $H_2O_2$ است



در اینجا نقطهٔ • نمایانگرالکترون پرنشدهٔ جفت HO است* و بنابراین به‌سادگی واکنش

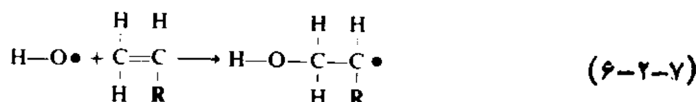
* آن را می‌توان به‌صورت‌زیر نشان داد،



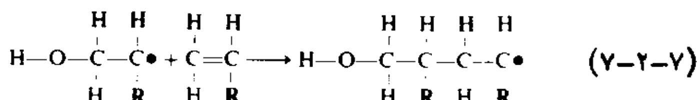
دراینجاهیچ‌یك از رادیکالهای $OH\bullet$ باردار نیستند. درعوض یون $OH^-$ بار الکترون اضافی را حمل می‌کند،



انجام خواهد داد. مثلا در برخورد با مولکول وینیل



بازهم رادیکال آزاد (و بلندتری) وجود دارد که می‌تواند با دیگری واکنش انجام دهد.



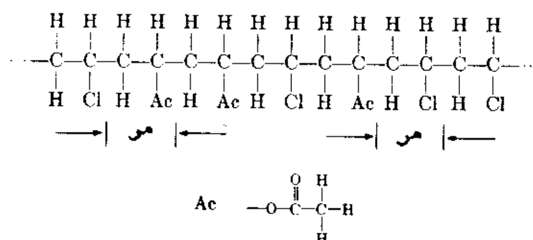
واکنش زنجیری همچنان گسترش می‌یابد تا مولکولی متشکل از تعداد زیادی واحد، یعنی پلی‌مر حاصل شود.

نیروی محرکه برای رابطهٔ (۷ـ۲ـ۶) و واکنشهای پیاپی، تغییر انرژی است. مثلا طرف چپ رابطهٔ (۷ـ۲ـ۷) شامل پیوند دوگانهٔ $C=C$ است در حالی‌که طرف راست آن یك جفت پیوند یگانهٔ $C-C$ اضافه دارد. سایر پیوندها تغییری نکرده‌اند. جدول ۲ـ۳ـ۱ نشان‌می‌دهد پیوندهای $C=C$ به‌ازای‌هرمول (هرمول‌شامل $۶٫۰ \times ۱۰^{۲۴}$ پیوند است)، ۶۸۰ کیلوژول انرژی دارند، هرپیوند $C-C$ به‌ازای هرمول، ۳۷۰ کیلوژول انرژی دارد. برای حذف پیوند دوگانهٔ رابطهٔ (۷ـ۲ـ۷)، باید $۱٫۱ \times ۱۰^{-۱۸}$ + ژول انرژی‌اعمال کرد؛ با تشکیل دوپیوند یگانه ($۶٫۰ \times ۱۰^{-۱۸}$) (۲)ــ ژول آزاد می‌شود. در نتیجه $۱٫۰ \times ۱۰^{-۱۸}$ ژول انرژی یا ۶۰ $kJ/mole$ در رابطهٔ (۷ـ۲ـ۷) به‌خارج داده‌می‌شود (ــ). ترکیبهای پلی‌مری حاصل از مونومرهای اولیه پایدارترند زیرا انرژی از دست داده‌اند.*

واکنشهاطبق‌روابط (۷ـ۲ـ۶) و (۷ـ۲ـ۷) ادامه می‌یابند تا آنکه به‌دلیل (۱) تمام شدن‌مونومرها یا (۲) برخورد ومتصل‌شدن دو انتهای رشدکنندهٔ زنجیرها، واکنشها خاتمه یابند. به‌این‌ترتیب مولکولهایی با اندازه‌های مختلف حاصل می‌شود زیرا مولکولهای مختلف در زمانهای مختلفی رشد خود را متوقف می‌کنند (شکل ۷ـ۱ـ۵).

**کوپلی‌مرها.** هریك از وینیل‌پلی‌مرها که‌دربالا ذکر شد تنها یك نوع مر دارند. پلی‌اتیلن فقط‌مرهای ($C_2H_4$)دارد، پلی‌وینیل کلرید تنها شامل‌مرهای ($C_2H_3Cl$) است وپلی‌وینیل الکل فقط از مرهای ($C_2H_3OH$) تشکیل شده است. وقتی دانشورزان دریافتندکه پلی‌مرهای افزایشی که شامل مخلوطی از دویا چند مر مختلف‌اند، دارای خواص فیزیکی و مکانیکی‌مرغوبتری هستند درتکنولوژی تولید پلی‌مرها پیشرفت قابل‌توجهی به‌وجودآمد.

* عامل دیگری‌که باید به‌شمار آید «آنتروپی» است، ولی مسئلهٔ فوق را تغییر نمی‌دهد.

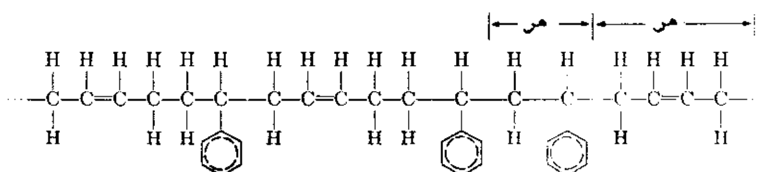



**شکل ۷-۲-۱** کوپلی‌مرشدن وینیل‌کلرید و وینیل‌استات. این واکنش با محلول جامد در بلورهای فلزی و سرامیکی قابل‌مقایسه است.

مثلا ممکن است در زنجیر پلی‌مری مرهای وینیل کلرید و وینیل‌استات موجود باشد (شکل ۷-۲-۱). مولکول حاصل کوپلی‌مر نامیده می‌شود. خواص کوپلی‌مر حاصل ممکن است با خواص هرکدام از اجزای ترکیب کاملا متفاوت باشد. جدول ۷-۲-۳ خواص و کاربردهای گوناگون مخلوط وینیل‌کلرید ـ وینیل‌استات را با درجات مختلف کوپلی‌مرشدن نشان‌می‌دهد. باتوجه به‌تنوع‌زیادی که‌دراین‌خواص دیده‌می‌شود می‌توان‌پلاستیکهایی باکاربردهای مختلف تهیه‌کرد.

پلی‌مرهای ABS کوپلی‌مرهای سه‌تایی‌اند که از اکریلونیتریل، بوتادین‌واستیرن تشکیل شده‌اند (جدولهای ۷-۲-۱ و ۷-۲-۲). کوپلی‌مرشدن در زمینهٔ تولید لاستیکهای مصنوعی کاربرد بسیار دارد. مثلا لاستیکهای بونا ـ S کوپلی‌مرهای بوتادین واستیرن‌اند (شکل ۷-۲-۲). دراصل کوپلی‌مرها با آلیاژهای محلول جامد فلزات، مثلا برنج و مفرغ قابل‌مقایسه‌اند زیرا درساختار اصلی بیش‌از یك جزء را شامل می‌شوند.

پلی‌مرشدن **تراکمی**. برخلاف واکنشهای افزایشی که اساساً جمع‌شدن مولکولهای مجزا و تشکیل پلی‌مر است، واکنشهای تراکمی مولکول دیگری که غیرقابل پلی‌مرشدن است، به‌عنوان محصول فرعی تولید می‌کنند. این محصول فرعی معمولا آب یا مولکول ساده‌ای

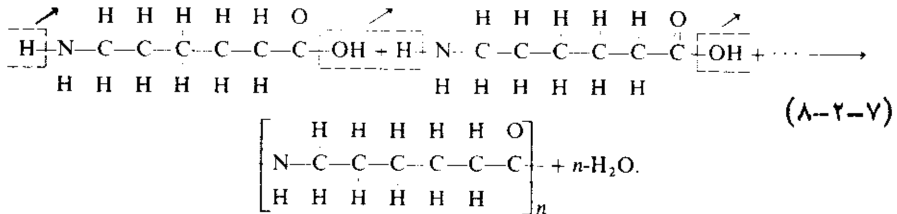



**شکل ۷-۲-۲** کوپلی‌مرشدن بوتادین و استیرن. بسیاری ازلاستیکهای‌مصنوعی براین‌اساس تولید می‌شوند. (در حلقهٔ بنزن هیدروژنها رسم نشده‌اند.)

**جدول ۷-۲-۳** کوپلی مرهای‌وینیل‌کلریداستات: رابطهٔ بین ترکیب، وزن مولکولی، وکاربرد

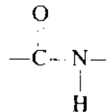
| مورد | درصدوزنی وینیل‌کلرید | نسبت تعداد مرهای کلرید به‌مرهای استات | گسترهٔ میانگین وزن مولکولی | کاربردهای کلی |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| پلی‌وینیل‌استات راست زنجیر | ۰ | ۰ | ۱۵۰۰۰—۴۸۰۰ | عمدتاً به‌چسبها محدود می‌شود. |
| کوپلی‌مرهای کلرید-استات | ۸۷—۸۵ | ۹—۸ | ۹۵۰۰—۸۵۰۰ | روکش قوطیهای کنسروومواد غذایی؛ برای پوشش دادن آن روی سطوح به‌حدکافی درحلالهای کتون حل می‌شود. |
| | ۸۷—۸۵ | ۹—۸ | ۱۰۵۰۰—۹۵۰۰ | پلاستیکهایی با استحکام خوب و مقاوم در حلالهایند؛ وقابلگیری آنها به‌روش تزریقی است. |
| | ۹۰—۸۸ | ۱۳—۱۰ | ۲۳۰۰۰—۱۶۰۰۰ | الیاف‌مصنوعی که باچرخش خشك ساخته‌می‌شوند؛ مقاومت عالی درمقابل حلالها و نمکها دارند. |
| | ۹۵ | ۲۶ | ۲۲۰۰۰—۲۰۰۰۰ | جانشین لاستیك روکش سیمهای برق شده است؛ بایدبه‌حالت نرم‌باشد؛ بافشارکاری شکل می‌گیرد. |
| پلی‌وینیل‌کلرید راست‌زنجیر | ۱۰۰ | — | — | کاربردهای محدود صرفاً تجارتی دارد. |

چون HCl یا $CH_3OH$ است. نایلون مثال آشنایی از پلی‌مرهای تراکمی است. واکنش پلی‌مرشدن آن به‌قرار زیر است

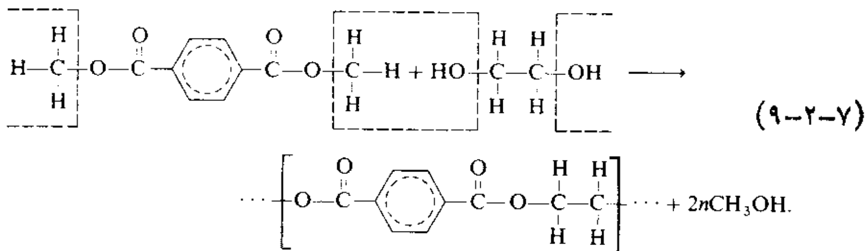


(۷-۲-۸)

هیدروژن و OH از دو انتهای مولکول گرفته‌می‌شود و مولکولهای کوچك $H_2O$ به‌صورت محصول فرعی حاصل می‌شوند. آب می‌تواند از پلاستیك جدا شود و پلی‌مر خطی را باچند واحد $-CH_2-$ و یك اتصال



برجا گذارد. یکی از پلی‌استرهای معمولی حاصل واکنش دو واکنشگر است



(۷-۲-۹)

محصول فرعی تولیدشده در این‌مورد متیل الکل است. رشد پلی‌مر ادامه‌می‌یابد تا مولکول خطی بزرگی حاصل شود.*[1] واکنشهای تراکمی در روابط (۷-۲-۸) و (۷-۲-۹)

---

* حاصل رابطهٔ (۷-۲-۸) معمولا نایلون-۶ نامیده می‌شود زیرا هر مرش‌کربن دارد. انواع‌دیگری از نایلونها نیز با استفاده از مرهایی با اندازه‌های دیگر به‌وجود می‌آیند. حاصل رابطهٔ (۷-۲-۹) ازنظر تجارتی نامهای مختلفی نظیر داکرون، میلار، تریلن، ترگال، یا ترویرا دارد و اینها به‌شرکت تولیدکننده و شکل فیزیکی آن از قبیل رشته یا لایه بستگی دارند.

۱. حاصل‌رابطهٔ (۷-۲-۹) نوعی‌پلی‌استر است زیرا شامل یك اتصال $-\overset{O}{\overset{\|}{C}}-O-$ است.

←

درست‌مانند واکنش‌افزایشی، انرژی‌آزاد می‌کنند (مثال ۷-۲-۳). این نیروی محرکه‌ای است که فرایند را فعال می‌کند.

رشد پلی‌مرهای تراکمی هیچوقت به‌طور مطلق خاتمه نمی‌یابد. دو انتهای مولکول درحال رشد، فعال باقی می‌مانند. این برخلاف مولکولهای رشدکننده در واکنش افزایشی رابطهٔ (۷-۲-۷) است که درآن واکنشهای زنجیری فقط دریك جهت رشد می‌کنند و در نتیجه بااتصال‌دو زنجیر، واکنش خاتمه‌می‌یابد. این‌تفاوت، در توزیع اندازهٔ‌مولکولهایی که درنهایت‌به‌دست می‌آیند مؤثرخواهد بود. مولکول تراکمی همیشه می‌تواند به‌مولکول دیگری متصل شود و رشد آن ادامه یابد.

**مثال ۷-۲-۱** پلی‌پروپیلن $\text{+}H_2C=CHCH_3\text{+}_n$ وینیلی است که در آن R، $-CH_3$ است. درحین پلی‌مرشدن به‌ازای هرگرم محصول چه مقدار انرژی آزاد می‌شود؟

حل: مبنا: یك مر، که درآن یك پیوند دوگانه، دوپیوند یگانه تشکیل می‌دهد

$$\text{گرم} = \frac{۳۶+۶\ g}{۰٫۶ \times ۱۰^{۲۴}}$$

$$\text{انرژی لازم} = \frac{۶۸۰۰۰۰\ J}{۰٫۶ \times ۱۰^{۲۴}}$$

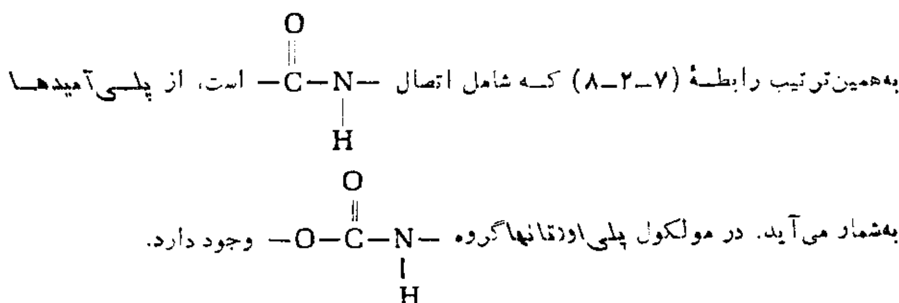
$$\text{انرژی آزادشده} = -\frac{۲(۳۷۰۰۰۰\ J)}{۰٫۶ \times ۱۰^{۲۴}}$$

$$\text{انرژی به‌ازای هرگرم} = \frac{+۶۸۰۰۰۰-۲(۳۷۰۰۰۰)}{۴۲\ g}$$

$$= -۱۴۳۰\ J$$

توضیح. همهٔ وینیلها درحین پلی‌مرشدن به‌ازای هرمول، ۶۰ kJ انرژی آزاد

→



می‌کنند زیرا در همهٔ آنها یك‌پیوند دوگانه به‌دوپیوند یگانه تبدیل می‌شود. ▲

**مثال ۷-۲-۲** کوپلی‌مری‌حاوی ۹۲ درصد وزنی وینیل کلرید و۸درصد وزنی وینیل‌استات است. کسر مر VAc چقدر است؟

حل: از جدول ۷-۲-۱

$$\text{VC} = (C_2H_3Cl) = ۲۴ + ۳ + ۳۵٫۵ = ۶۲٫۵\ \text{amu}/\text{مر}$$

$$\text{VAc} = (C_2H_3OCOCH_3) = ۴۸ + ۶ + ۳۲ = ۸۶\ \text{amu}/\text{مر}$$

مبنا: ۱۰۰ amu

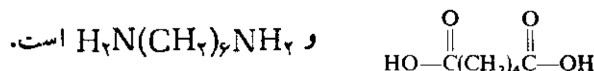
$$\text{VC:}\ ۹۲/۶۲٫۲ = ۱٫۴۷۲\ \text{مر} = ۰٫۹۴۱$$

$$\text{VAc:}\ ۸/۸۶ \quad = ۰٫۰۹۳\ \text{مر} = ۰٫۰۵۹$$

۱٫۵۶۵ مر

توضیح. این کوپلی‌مر به‌ازای هر مراستات تقریباً ۱۶ مر کلرید دارد. کاربردهای ممکن آن در جدول ۷-۲-۳ درج شده‌است. ▲

**مثال ۷-۲-۳** نایلون-۶۶ پلی‌مری تراکمی از




و $H_2N(CH_2)_6NH_2$ است.

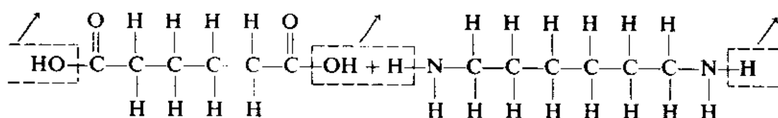
الف) ساختار این دومولکول را رسم کنید؛

ب) نشان دهیدکه پلی‌مرشدن تراکمی چگونه صورت می‌گیرد؛

ج) به‌ازای هرمول $H_2O$ چقدر انرژی آزاد می‌شود؟

حل:

الف) و ب)




ج) برای تولیدیك‌مول($۰٫۶ \times ۱۰^{۲۴}$)آب، بایدهمین‌تعدادپیوندC — O و H — N ازبین برود و پیوندهای C — N و H — O به‌تعداد مساوی تشکیل شود.

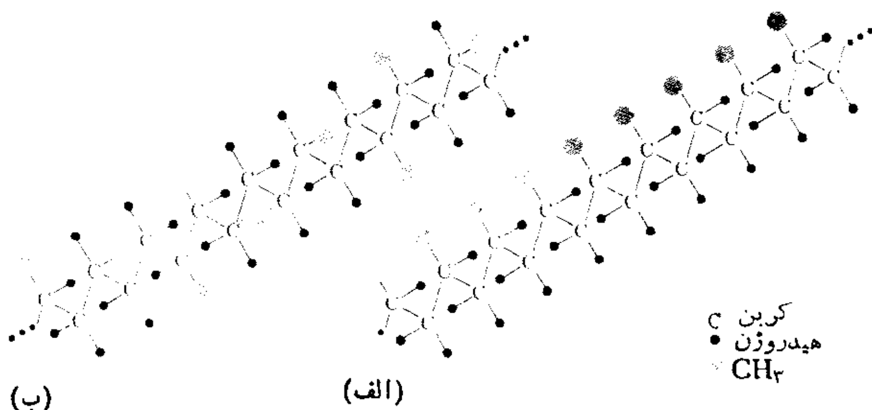
| پیوند تشکیل شده | | پیوند حذف شده | |
|---|---|---|---|
| ۳۰۵− کیلوژول برمول | C−N | ۳۶۰+ کیلوژول برمول | C−O |
| ۵۰۰− | H−O | ۴۳۰+ | H−N |
| ۸۰۵− | | ۷۹۰+ | |

اختلاف انرژی خالص ۱۵− کیلو ژول برمول (یا ۳٫۵− کیلوکالری برمول) است. ▲

## ۷-۳ بی‌نظمیهای مولکولی

یك مولکول خطی به‌ندرت نظم‌هندسی شبیه به‌شکل ۷-۱-۴ دارد. آشفتگی گرمایی در آن گره ایجاد مـی‌کند (شکل ۷-۱-۷). مگر آنکـه زنجیر پلی‌مر قید داشته باشد. همچنین گفته شد که می‌توان کوپلی‌مرهایی با بیش‌از یك‌نوع مر تولید کرد. خواهیم دیدکه برخی از بی‌نظمیها به‌این دلیل وجود می‌آیندکه برای اتصال مونومرها در زنجیر پلی‌مـر، چند تبدیل صورت می‌گیرد و سایر بی‌نظمیها مانند گروههای قطبی به‌طور ذاتی در بسیاری از زنجیرها وجود دارند. هرکدام از این بی‌نظمیها برنحوهٔ قرارگیری مولکولهای مجاور و رفتار مکانیکی مواد حاصل اثر می‌گذارد.

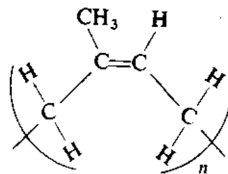
از آنجا که مولکولها طویل و ناهماهنگ‌اند و جـاذبهٔ بین آنها نیز ضعیف است بلوری‌شدن در پلی‌مرها مشکل خواهد بود. به‌علاوه خواهیم دیدکـه این بی‌نظمیها ممانعت بیشتری ایجاد می‌کنند. بنابراین عیوب پلی‌مر را دقیقاً بررسی خواهیم کرد.




**شکل ۷-۳-۱** ایزومرهـای فضایی (پلی‌پروپیلن). الف) تك‌آرایش؛ ب) بی‌آرایش.

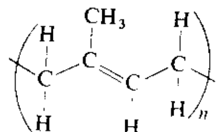
**ایزومرهای فضایی.** در زنجیر مولکولی شکل۷ـ۳ـ۱ (الف) نظم زیادی درطول پلی‌مر دیده می‌شود. نه‌تنها افزایش مونومرها و تشکیل پلی‌مـر خطی ترتیب مشخصی دارد، بلکه مرهای پروپیلن نیزچنان نظمی‌دارندکه رادیکالها همیشه در موقعیتهای معین درون مر قرار می‌گیرند. چنین نظمی تك آرایشی نام‌دارد و برخلاف ترتیب‌دیگر یعنی بی‌آرایش است که درشکل ۷ـ۳ـ۱ (ب) دیده می‌شود.

مثال دوم از آرایش‌پلی‌مری، لاستیکهایی‌اندکه ازمولکولهای نوع بوتادین ساخته می‌شوند (جدول۷ـ۲ـ۲). لاستیك طبیعی ازپلی‌مرشدن مر ایزوپرن باساختار زیر به‌وجود می‌آید



(۷ـ۳ـ۱)

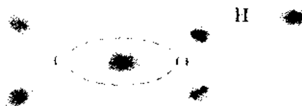
دراین حالت دوکربنی‌که پیوند دوگانه‌دارند دارای یك گروه $CH_3$ و یك هیدروژن در یك‌طرف‌زنجیرند. این آرایش‌که سیس نامیده می‌شود چون‌موجب کمانی‌شدن مر می‌شود در رفتار زنجیر بسیار اهمیت‌دارد (رابطهٔ ۷ـ۳ـ۱). حالت دیگر دارای گروه $CH_3$ در یك طرف و هیدروژن تنهایی در طرف دیگر زنجیر است و آرایش ترانس را به‌وجـود می‌آورد.



(۷ـ۳ـ۲)

اگرچه این دو ایزومرایزوپرن ترکیب یکسانی دارند ولـی از نظر ساختار متفاوت‌اند و بنابراین‌خواص مختلفی‌دارند. لاستیك‌طبیعی‌باساختارنوع‌سیس‌خودبه‌دلیل‌کمانی بودن مر، دارای زنجیر بسیار گره خورده‌ای است. پلی‌مر نوع ترانس‌که گوتاپرشا نام دارد زاویهٔ پیوندی دارد که بیشتر شبیه به‌پلی‌مرهـای خطی است (شکل ۷ـ۱ـ۴). موقعیتهای اشباع نشده‌درطرفین‌پیوند دوگانه یکدیگر را موازنه‌می‌کنند. درنتیجه خواص بسیارمتفاوت‌اند.

**گروههای قطبی.** بین‌زنجیرهای مجاور پلی‌اتیلن جاذبهٔ نسبتاً کمی وجود دارد. درنتیجه به‌صورت پارافینهای‌بسیار بلندند و همان‌مشخصات مومی را دارند. هنگامی‌که تنش‌برشی اعمال می‌شود مولکولها روی‌هم می‌لغزند. سایر مولکولها جاذبهٔ بین مولکولی بزرگتری نشان می‌دهند بخصوص اگر دارای گروههـای قطبی باشند: یکی از این گروههای قطبی

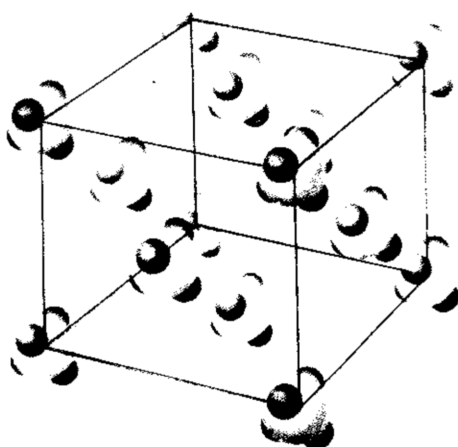


(۷ـ۳ـ۳)

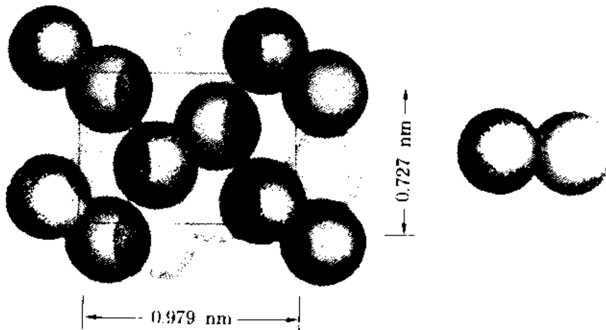
C = O در روابط (۷–۲–۸) و (۷–۲–۹) است.
این گروه، یك‌دوقطبی الکتریکی ویك اکسیژن در انتهای منفی آن دارد. دوجفت الکترون تنهادر اکسیژن (به‌شکل۲–۳–۴ (ب) رجوع کنید)، اتمهای‌هیدروژن مولکولهای مجاور را باقدرت جذب‌می‌کنند زیرااتمهای‌هیدروژن در انتهای‌پیوند کووالانسی، پروتون(+) ساده‌اند. وجود این گروههای قطبی خـواص پلی‌مر را به‌میزان قابل‌ملاحظه‌ای تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. مثلا اختلاف بین نایلون وپلی‌اتیلن را می‌توان به‌این گروههای قطبی نسبت داد زیرا مولکولهای هردو همان واحدهای $CH_2$ را دارند.

**بلورهای مولکولی.** از آنجاکه هرمولکول‌حاوی بیش‌ازیك‌اتم‌است، دربلورهای‌مولکولی باید به‌آرایش فشردگی نظر بیفکنیم که ازآنچه در بلورهای فلزی است پیچیده‌تر است. متان یکی‌از مولکولهایی است که تجسم‌کردنشان ساده‌تر است، زیرا مـولکولهای $CH_4$ تقارن نسبی دارند و تقریباً شبیه به‌کره‌اند (شکل ۷–۳–۲). یـدمولکول پیچیده‌ای نیست زیرا مولکول‌آن فقط دواتم دارد، $I_2$. ولی این مـولکول دواتمی کروی نیست. بنابراین یدبلوری سلول واحد مکعبی تشکیل نمی‌دهد و به‌جای‌آن، مطابق با شکل ۷–۳–۳، مکعب مستطیلی ($a \neq b \neq c$) است.

بلوری شدن پلی‌اتیلن پیچیده‌تر است زیرا مولکول تا خارج ازسلول واحد امتداد می‌یابد (شکل ۷–۳–۴). بـا این‌حال از این‌شکل می‌توان دریافت کـه در سلول واحد

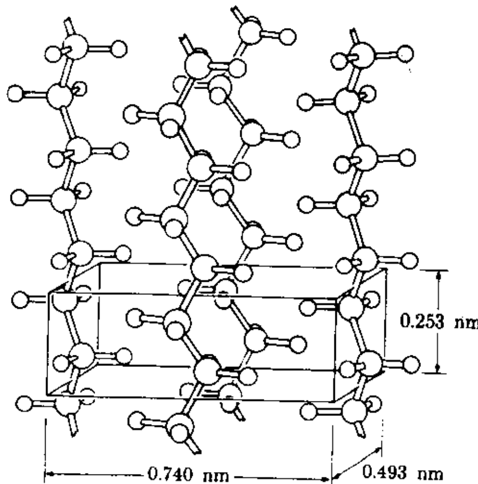


**شکل ۷–۳–۲** ترکیب FCC (متان $CH_4$) هرنقطهٔ شبکهٔ fcc حـاوی مولکولی پنج‌اتمی‌است. متان در $-183\ ^\circ C$ (90K) منجمد می‌شود بین 20K و 90K مولکولها می‌توانند درمکان شبکه‌ای خود بچرخند، زیر 20K مولکولها ترتیب یك‌شکلی، مثل آنچه دراینجـا نشان داده شده، دارند.




**شکل ۷-۳-۳** بلورمولکولی (ید). مولکول $I_2$ درساختار بلوری‌تکرار شونده به‌صورت واحد عمل می‌کند. این شبکه مکعب مستطیل ساده است زیرا $a \neq b \neq c$ و مکانهای‌مرکز وجوه بامکانهای‌گوشه‌ها یکسان‌نیست. (مولکولها جهتگیری متفاوتی‌دارند.) محورهای سلول واحد زاویهٔ °۹۰ می‌سازند.

پلی‌اتیلن، دو مر وجود دارد. در مثال ۷-۳-۱ چگالی پلی‌اتیلن ایـده‌ئال را محاسبه کرده جواب ۱٫۰۱ $g/cm^3$ را به‌دست خواهیم آورد. چگالـی به‌دست آمده از پلی‌اتیلنهای تجارتی، ۵ تا ۱۰٪ کمتر ازاین‌مقداراست (جدول ۷-۳-۱)، زیرا احتمال آنکه مولکولهای




**شکل۷-۳-۴** بلور مولکولی (پلی‌اتیلن). زنجیرهـا درامتداد طول قرار گرفته‌اند. سلول واحد مکعب مستطیل با زوایای °۹۰ است.

جدول ۷-۳-۱ مشخصات پلی‌اتیلنها

| | پلی‌اتیلن باچگالی کم (LDPE) | پلی‌اتیلن باچگالی‌زیاد (HDPD) |
|---|---|---|
| چگالی، $Mg/m^3$ $(g/cm^3)$ | ۰٫۹۲ | ۰٫۹۶ |
| بلورینگی، v/o | تقریباً صفر | ۵۰~ |
| انبساط گرمایی، $^\circ C^{-1}$ | $۱۸۰ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۲۰ \times ۱۰^{-۶}$ |
| رسانندگی گرمایی $(^\circ C/m)/($وات$/m^2)$ | ۰٫۳۴ | ۰٫۵۲ |
| مقاومت گرمایی برای استفادهٔ مداوم، $^\circ C$ | ۸۰-۵۵ | ۱۲۰-۸۰ |
| ۱۰ دقیقه در دمای $^\circ C$ | ۸۵-۸۰ | ۱۲۵-۱۲۰ |

بلند پلی‌اتیلن‌مانند شکل ۷-۳-۴ به‌صورت کاملا ردیف‌شده «مانند زیپ» باشند کم است. اگر این‌مولکولها کاملا ردیف شده‌نباشند ضریب فشردگی کم می‌شود و به‌میزانی می‌رسد که ۱۰ درصد حجمی «فضای آزاد» بین اتمها را موجب می‌شود.

تشکیل بلور در پلی‌اتیلن مشکل است* زیرا مولکولهای آن تا صدها سلول واحد ادامه‌یافته‌اند. درچنین مسافت زیادی احتمال اینکه زنجیرهای مجاور کاملا ردیف شده باقی‌بمانند بسیار کم‌است بخصوص آنکه زنجیرها هم‌طول‌نیستند و تحت آشفتگی گرمایی و تاشدگی قرار دارند. به‌علاوه فقط پیوندهای ضعیف واندروالس آنها را به‌هم نگه می‌دارد. بررسی تفرق اشعهٔ X (بخش ۳-۸) نشان می‌دهد که بلورینگی در پلی‌اتیلن کم چگالی، بسیارکم است (حدود $\rho_{LDPE} \sim$ ۰٫۹۲ $g/cm^3$). در پلی‌اتیلن با چگالی بیشتر (حدود $\rho_{HDPE} \sim$ ۰٫۹۶ $g/cm^3$) برخی مناطق بلوری می‌شوند ولی بین آنها نواحی بی‌شکل نیز یافت می‌شود به‌هرحال عملا نه‌چگالی کامل‌مشاهده شده است و نه بلوری شدن کامل.

باتوجه به‌پیچیدگیهای فوق تعجبی‌ندارد اگر بگوییم اکثر پلی‌مرها می‌توانند پس‌از ذوب، سردشوند و تا دمای اتاق‌برسند بدون آنکه مولکولهای آنها ردیف شوند و الگوی کاملا بلوری تشکیل دهند. فوق سرمایش در پلی‌مرها متداول است بخصوص اگر در طول زنجیر مولکولی‌بی‌نظمیهای ساختاری وجود داشته‌باشد. مثلا زنجیر بی‌آرایش‌که درشکل

---

* ولی به‌مشکلی بسیاری از پلی‌مرهای دیگر نیست.

۷-۳-۱(ب) نشان‌داده‌شده کمتر از زنجیر تك آرایش شکل ۷-۳-۱(الف) بلوری می‌شود.

**دمای انتقال شیشه‌ای در پلی‌مرها.** با آنکه مولکولهای پلی‌مر گره‌خورده و درگیرند، به‌علت آشفتگی گرمایی، اتمها و مولکولها در پلی‌مر مایع به‌طور مداوم از نو آرایش می‌یابند، و به‌همین‌دلیل می‌توان گفت در مایع باید «فضای آزاد» وجود داشته باشد. با کاهش دما، آشفتگی گرمایی کم‌می‌شود و «فضای آزاد» و دامنهٔ نوسانات نیز کاهش می‌یابد. درنتیجه، کاهش حجم به‌وجود می‌آید و تا پایینتر از نقطهٔ ذوب، در گسترهٔ مایع فوق سرمایش ادامه خواهد داشت (شکل ۴-۵-۳). ساختار مایع حفظ می‌شود. در این‌حال نیز، مانند مایع در دماهای بالاتر، جریان می‌یابد ولی هرچه دما کم می‌شود و فضای آزاد بین مولکولها کاهش و ویسکوزیته افزایش می‌یابد جریان یافتن آن مشکلتر می‌شود.

پلی‌مرهایی که بدون بلوری‌شدن سرد می‌شوند سرانجام به‌نقطه‌ای‌می‌رسند که آشفتگی گرمایی در آن برای نوآرایی‌مولکولها و به‌وجودآوردن فشردگی‌بیشتر یا واکنش در برابر نیروهای اعمال‌شدهٔ خارجی کافی نیست. دراین‌حال پلی‌مر به‌طور محسوسی صلبتر و تردتر می‌شود. به‌همین‌ترتیب‌ضریب انبساط گرمایی‌آن به‌تغییرات دامنهٔ‌نوسانات گرمایی محدود می‌شود و تغییراتی در «فضای آزاد» بین مولکولها ایجاد نمی‌کند. با این افزایش صلابت درحین‌سردکردن، درشیب منحنی حجم برحسب‌دما (شکل۴-۵-۳) یك‌ناپیوستگی‌به‌وجود می‌آیداین‌نقطهٔ‌تغییر درشیب‌منحنی، نقطهٔ شیشه‌ای یا دمای انتقال شیشه‌ای نام دارد. زیرا این‌پدیده‌برای تمام شیشه‌ها وجود دارد. در واقع زیر این دما، پلی‌مر غیربلوری درست مانند شیشه‌های سیلیسی معمولی، شیشه است (اگر چه مسلماً از نوع آلی است) به‌عکس درفصل۸ خواهیم دید که شیشهٔ معمولی پلی‌مری غیرآلی است.

دمای انتقال شیشه‌ای یا به‌طور خلاصه‌تر، دمای شیشه‌ای، $T_g$، به‌اندازهٔ نقطهٔ ذوب، $T_m$، (یا نقطهٔ‌انجماد) در پلی‌مرها اهمیت‌دارد. دمای شیشه‌ای پلی‌استیرن (جدول ۷-۲-۱) تقریباً $100\ ^\circ C$ است؛ بنابراین در دمای اتاق، شیشه‌ای و ترداست، در مقایسه، لاستیك که $T_g$ آن برابر با $-73\ ^\circ C$ است حتی در سرمای شدید زمستان نیز خمش‌پذیر است.

**مثال ۷-۳-۱** با استفاده از شکل ۷-۲-۴ چگالی پلی‌اتیلن کاملا بلورین را محاسبه کنید.

حل: مر $(C_2H_4)_n$ با دو انتهای واحد مکعب مستطیلی موازی است که معادل یك مر در هرسلول محسوب می‌شوند. موازی با دوپهلوی دیگر نیز یك مر وجود دارد. بنابراین در هرسلول واحد کلا دو مر وجود دارد

$$\rho = \frac{2(24+4\ \text{amu})/(0.602 \times 10^{24}\ \text{amu/g})}{(0.253 \times 0.740 \times 0.493)(10^{-27}\text{m}^3)} = 1.01 \times 10^6 \text{g/m}^3$$

(یا $1.01\ \text{g/cm}^3$)

توضیح. چگالی‌معمولا بسته‌به‌درجهٔ بلورین بودن در گسترهٔ ۰٫۹۲ تا $0.96\text{g/cm}^3$

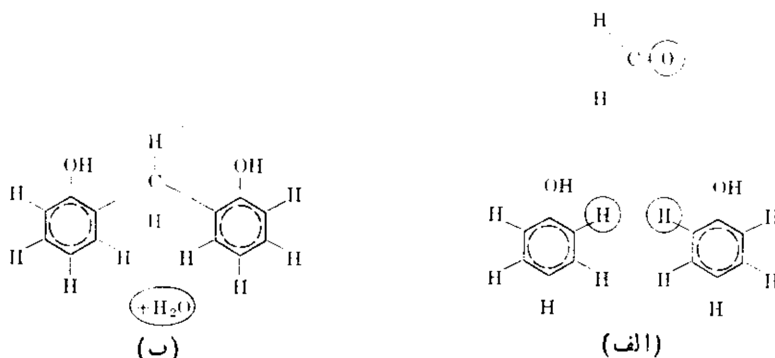
واقع است (مسئلهٔ ۷ـ۳ـ۳ و جدول ۷ـ۳ـ۱ را ببینید). درنتیجه فضای اضافی موجود است که در شیمی «فضای آزاد» نامیده می‌شود. ▲

## ۷ـ۴ پلی‌مرهای سه‌بعدی

اگر مونومرهای‌واکنشگر، چندعاملی باشند یعنی‌بتوانند به‌سه یا چند مولکول مجاور متصل شوند می‌توانند ساختار مشبک تولید کنند.

یکی از پلی‌مرهای تراکمی متداول که نامهای تجارتی گوناگونی نیز دارد از فرم‌آلدئید($CH_2O$) وفنل ($C_6H_5OH$) تشکیل می‌شود. آرایش‌اتمی‌درچنین مولکولهایی در شکل ۲ـ۳ـ۱ دیده می‌شود. در دمای اتاق فرم‌آلدئید به‌صورت گازوفنل جامدی با نقطهٔ ذوب پایین است. پلی‌مرشدن این دوجزء در شکل ۷ـ۴ـ۱ (ب) دیده می‌شود. فرم‌آلدئیدیك‌واحد $CH_2$ به‌وجود می‌آورد که‌بین دوحلقهٔ‌بنزن دردوفنل پل برقرار می‌کند. دوهیدروژن ازحلقه‌های بنزن و یك‌اکسیژن از فرم‌آلدئید آب تشکیل می‌دهند که‌می‌تواند تبخیر و از سیستم خارج شود. واکنش شکل ۷ـ۴ـ۱ در چندین نقطهٔ اطراف مولکول فنل ممکن است به‌وقوع بپیوندد.* حاصل این چندعاملی بودن، به‌جای زنجیر خطی، شبکه‌ای مولکولی است (شکل ۷ـ۴ـ۲).

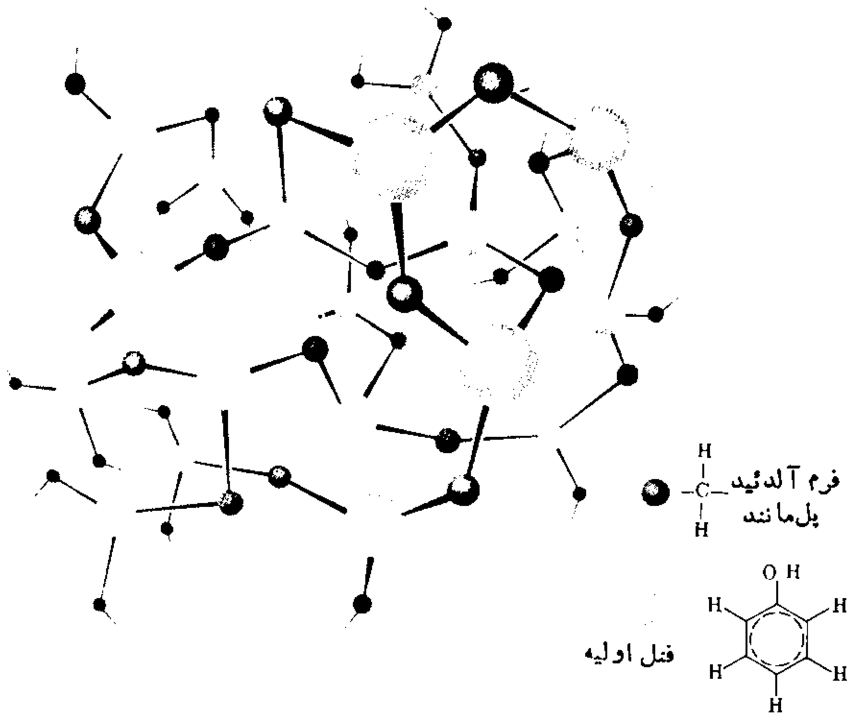
**پلی‌مرهای گرما سخت و گرما نرم.** پلی‌مر موردبحث یعنی فنل ـ فرم‌آلدئید (PF) یکی




**شکل ۷ـ۴ـ۱** واکنش فنل ـ فرم‌آلدئید. فنلها ($C_6H_5OH$) هیدروژن و فرم‌آلدئید ($CH_2O$) اکسیژن ایجاد می‌کندکه از ترکیب آنها آب به‌عنوان محصول فرعی حاصل می‌شود. دوحلقه توسط پل $-CH_2-$ متصل می‌شوند.

---

* معمولاً حداکثر تعداد ۳ است زیرا فضای موجود برای بیش‌از سه‌پل $CH_2$ کافی نیست. تعداد، توسط ممانعت فضایی محدود می‌شود.




**شکل ۷-۴-۲** ساختار شبکه‌ای واحدهای چندعاملی. تغییر شکل به‌سادگی پلی‌مرهـای خطی که از واحدهای دوعاملی تشکیل شده‌اند، رخ‌نمی‌دهد.

از نخستین پلاستیکهای مصنوعی است. هنگام گرم‌شدن نرم نمی‌شود زیرا ساختار مشبکش آن را صلب نگه‌می‌دارد. البته این بدان معنی است کـه به‌همان روش پلی‌مرهـای خطی نمی‌تـوان آن را قالبگیری کرد. برای قالبگیری فنل ـ فرم‌آلدئید باید با مخلوطی کـه به‌طور جزئی پلی‌مری شده است شروع کرد. در این‌مرحله مخلوط جامد است ولی به‌طور متوسط بین‌فنلهای مجاور کمتراز سه‌پل $CH_۲$ وجود دارد، و بنا براین تحت‌فشار تغییرشکل می‌یابد. با نگه‌داشتن آن در ۲۰۰ تـا $۳۰۰\ ^\circ C$، پلی‌مرشدن آن تکمیل می‌شود و ساختار سه‌بعدی صلبتری به‌دست می‌آید. این‌عمل سخت‌شدن با گرما نامیده‌می‌شود، تولیدکنندگان، این نوع پلی‌مرها را گرما سخت می‌نامند. پس‌از تولید این پلی‌مرها می‌توان بدون آنکه منتظر سردشدن قطعه شویم آن را از قالب خارج کنیم.

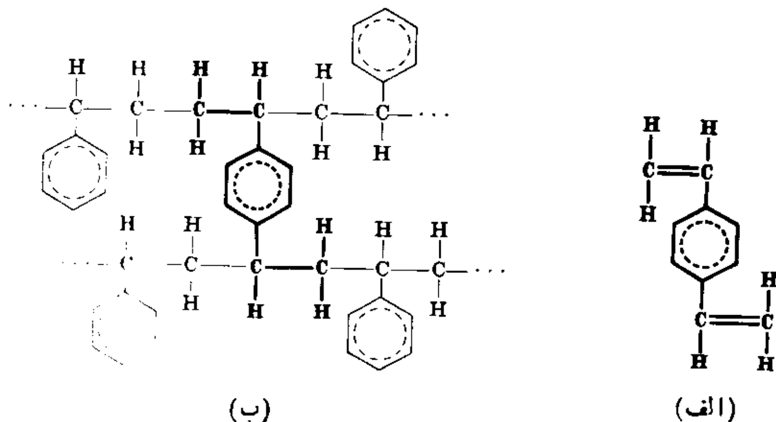
برخلاف گرما سختها، گرمانرمها[۱]، پلی‌مر خطی‌اند که می‌توان آنها را درحالت گرم به‌داخل قالب تزریق کرد، زیرا دردماهای بالاتر نرم می‌شوند. گرمـانرمها را نباید قبل ازسردشدن از قالب‌خارج کرد زیرا شکل خود را از دست‌خواهند داد. درحین‌قالبگیری پلی‌مرشدن بیشتری انجام نمی‌گیرد. اختلاف اساسی بین گرما سختها و گرمانرمهـا دراین

است که ساختار مولکولی اولی سه‌بعدی و دومی خطی است. این تفاوت در مراحل تولیدی وهم در کاربردهای مهندسی به‌علت آثارش روی قالبگیری و کاربرد آن در دماهـای بالا اهمیت زیادی دارد.

**اتصال متقاطع.** برخی از مـولکولهای خطی، به‌دلیل خواص ساختاری خـود، می‌توانند به‌صورت سه‌بعدی به‌هم‌متصل شوند. مولکول شکل ۷ـ۴ـ۳(الف) و حالت پلی‌مر شدهٔ آن را در شکل ۷ـ۴ـ۳ (ب) درنظر بگیرید. برخی از مواد کـه عمداً افزوده می‌شوند (در این مورد دی‌وینیل‌بنزن) موجب اتصال دو زنجیر خطی‌پلی‌استیرن به‌یکدیگر می‌شوند. به این‌ترتیب تغییرشکل پلاستیکی تا اندازه‌ای محدود می‌شود.

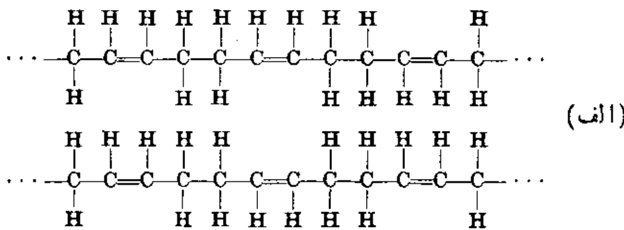
وولکانش لاستیك همان‌طورکه شکل۷ـ۴ـ۴ طرحوارهٔ آن را نشان می‌دهد، نتیجهٔ اتصال متقاطع به‌وسیلهٔ گوگرد است که‌اثر بسیارقابل توجهی دارد. بدون گوگرد، لاستیك ماده‌ای نرم و چسبناك است، نزدیك به‌دمای اتاق باتغییرشکل ویسکوز جریان می‌یابد. چنین لاستیکی را نمی‌توان درتایر اتومبیل به‌کاربرد زیرا در دمای کاربرد آن، مولکولها ممکن است روی هم بلغزند، بخصوص تحت فشارهایی که اعمال می‌شود. اتصال متقاطع تقریباً ۱۰٪ ازنقاط ممکن به‌وسیلهٔ گوگرد، در وضعیت فوق به‌لاستیك پایداری مکانیکی می‌بخشد و این درحالی است که هنوز خمش‌پذیری لازم را نیز دارد. لاستیك سخت درصد بیشتری گـوگرد و درنتیجه اتصالات متقاطع زیادتری دارد. اثر افزودن مقدار بیشتری گـوگرد روی خواص لاستیك را مـی‌توان با بررسی محصولی از لاستیك سخت مانند شانه جیبی امتحان کرد.

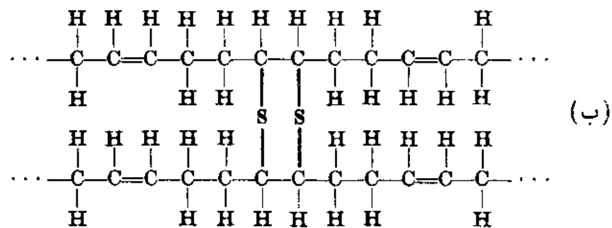
**شاخه‌دار شدن.** مولکولهای پلی‌مرخطی ایدئال که تاکنون مطالعه‌کرده‌ایم زنجیرهایی‌اند



(ب) (الف)

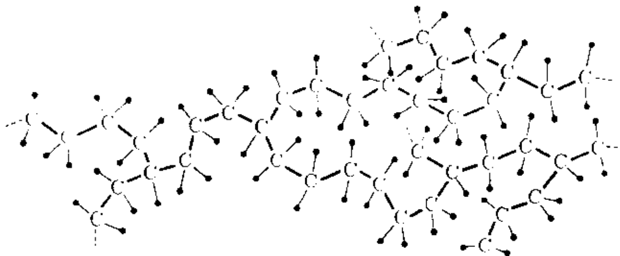
**شکل ۷ـ۴ـ۳** اتصال متقاطع پلی‌استیرن. دی‌وینیل‌بنزن (الف) چهارعاملی‌است یعنی چهار نقطهٔ واکنش دارد و ضمن اتصال، به‌صورت جزئی از دو زنجیر مجاور درمی‌آید.




**شکل ۷-۴-۴** وولکانش (لاستیکهای نوع بوتادین) اتمهای گوگرد زنجیرهای مجاور را بههم اتصال می‌دهند. دراین نمایش وولکانش برای هرجفت از مرها دو گوگرد لازم است (حالات دیگری از اتصال متقاطع نیز ممکن است).

که دو انتها دارند، اگرچه حالتهایی وجود دارند که درآنهازنجیر پلی‌مر شاخه‌دارمی‌شود، شکل ۷-۴-۵ طرحوارهٔ آن‌را نشان می‌دهد. با آنکه یك شاخهٔ غیرعادی به‌نظرمی‌رسد ولی‌پس‌از تشکیل پایدارخواهد شد زیرا هراتم کربن باچهارپیوند وهر اتم هیدروژن بایك پیوند کامل می‌شوند. شاخه‌دار شدن از این‌نظر مهم است‌که ساختار سه‌بعدی درهم پیچیده‌ای به‌وجود می‌آوردکه‌مانع از تغییرشکل پلاستیکی می‌شود. برای مقایسه، شاخه‌های انبوه یك‌درخت



**شکل ۷-۴-۵** شاخه‌دارشدن (پلی‌اتیلن). مولکول خطی شکل ۷-۱-۴ شاخه‌دار شده است. نوعی مکانیسم شاخه‌دار شدن درشکل ۷-۷-۳ دیـده می‌شود. (اتمهای هیدروژن به‌وسیلهٔ نقطه مشخص شده‌اند.)

و دسته‌ای عصا را درنظر بگیرید، حرکت‌دادن یك‌شاخه نسبت به‌همسایه‌هـایش، به‌مراتب مشکلتر از حرکت دادن یکی از عصاهاست.

**مثال ۷-۴-۱** برای‌تولید ۱۰۰ گرم‌لاستیك چقدر گوگرد لازم است تا بوتادین ($C_4H_6$) به‌طور کامل اتصال متقاطع تشکیل دهد و درهر اتصال یك گوگرد قرار گیرد؟

حل : هر مربوتادین یك اتم گوگرد (۳۲) لازم دارد ۵۴ = (۱)(۶) + (۱۲)(۴)

$$\text{کسر گوگرد} = \frac{۳۲}{۳۲+۵۴} = ۰٫۳۷ \quad \text{یا} \quad ۳۷\text{gS}/۱۰۰\text{ g محصول}$$ ▲

**مثال ۷-۴-۲** اگر محصول ۱۸/۵٪ گوگرد داشته‌باشد، چه‌کسری از بوتادین ($C_4H_6$) اتصال متقاطع تشکیل داده است؟ (فرض‌کنید‌که تمام گوگرد در اتصالات متقاطع مصرف شود و هر اتصال تنها یك گوگرد بگیرد.)

حل: تعداد $x$ اتمهای گوگرد (۳۲=) را به‌ازای هر مربوتادین

$$[=(۴)(۱۲)+(۶)(۱)=۵۴]$$

از نسبت وزنی بوتادین به‌گوگرد معین کنید.

$$\frac{\text{گرم بوتادین}}{\text{گرم گوگرد}} = \frac{۱-۰٫۱۸۵}{۰٫۱۸۵} = \frac{۱(۵۴)}{x(۳۲)}$$

$$x = ۰٫۳۸۳$$

توضیح. جواب‌را نمی‌توان ازمثال۷-۴-۱ به‌صورت۳۷/۱۸٫۵ به‌دست آورد. ▲

## ۷-۵ تغییرشکل مواد پلی‌مری

پلی‌مرها درست‌مانند فلزات، هم‌تغییرشکل کشسان وهم تغییرشکل پلاستیکی دارند. به‌طور کلی مدول کشسانی پلی‌مرها کمتر از فلزات‌است (به‌قسمتهای ۱ و ۳ پیوست* رجوع کنید). این‌مشخصات غالباً مفیدند زیرا تنش‌کم به‌ازای هرواحد کرنش، اساس‌استفاده از لاستیك است همچنین به‌طورکلی پلی‌مرها بسیار آسانتر از فلزات تغییرشکل پلاستیکی مـی‌یابند، اصطلاح متداول پلاستیك، تأکیدی است بر مزیت‌کار کردن بـا پلی‌مرها. دراینجا خواص تك‌تك پلی‌مرها بررسی نمی‌شود بلکـه شاخصی برای مشخصات تکنیکی به‌دست خواهیم

* البته استثناهایی وجود دارد. سرب و سایر فلزاتی که نقطهٔ ذوب پایین دارند دارای مدول کشسانی کمتر از MPa ۷۰۰۰۰ هستند. بعضی ازپلی‌مرها باحلقه‌های آلیفاتیك دراستخوانبندی خود مدول بزرگتری دارند. البته این نمونه‌ها حدهای پایینی و بالایی مدول کشسانی مربوط به‌فلزات و پلی‌مرها را دارند.

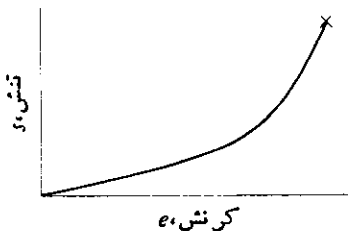
آورد. هنگامی مــی‌توان در انتخاب پلاستیك موفق بود و محدودیتهای آن را دانست کــه بدانیم چه‌عاملی لاستیك را کشسان می‌کند و چرا پلی‌استیرن به‌صورت ویسکوز در قالب جریان می‌یابد.

**الاستومرها •** پلی‌مرهایی که تغییرشکل کشسان زیــادی دارند الاستومر نامیده مــی‌شوند. اساس کرنش زیاد آنهاصورت‌بندی گره خورده است (که دربخش۷ـ۱ درمورد آن بحث شد). مثلا درمثال۷ـ۱ـ۴ متوسط‌فاصلهٔ بین دوانتهای مولکولها nm ۶۲ است. اگر تنشی اعمال شودکه زنجیر مولکولی را از صورت‌بندی شکل ۷ـ۱ـ۷ منفصل کند، مولکولهای مثال ۷ـ۱ـ۴ چندین نــانومتر ازدیاد طــول پیدا می‌کنند. البته، حتی در لاستیکهای غیر ولکانیده هیچوقت ازدیــاد طول به nm ۲۰۰ نمی‌رسد، اما معمولا درصد زیادی کرنش کشسان به‌وجود می‌آید. از آنجا کــه صورتبندی کشیده شدهٔ لاستیك ذاتی نیست؛ پس‌از برداشتن تنش مولکولها فوراً باچرخش پیوندها دوباره‌گره می‌خورند.

بازشدن گره و دوباره گره‌خوردن هنگامی اتفاق می‌افتد که الاستومر یا لاستیك در بالاتراز دمای شیشه‌ای خود، $T_g$، باشد تا مولکولهای مجاور نــوآرایی یابند. پایینتراز $T_g$ الاستومر سخت و ترد است.*

ناحیهٔ کشسان منحنی تنش- کرنش لاستیك بــا این ناحیه درمنحنی مربوط به‌فلزات تفاوت دارد. کــرنش اولیه باتنش کم به‌سادگی پدید مــی‌آید زیرا مولکولهــا به‌آسانی گره‌خوردگی خود را از دست‌می‌دهند. این‌موجب مدول کشسانی پایینی‌می‌شود، به‌تدریج که مولکولها مستقیم شده وباهم دریك امتداد قرار می گیرند هرافزایشی در کرنش، به‌تنش بیشتری نیاز دارد (شکل ۷ـ۵ـ۱)، و مدول کشسانی افزایش می‌یابد. داده‌هایی که برای لاستیکهــا درپیوست (ج) نوشته شده‌اند برای نسبت اولیهٔ تنش- کرنش است. زیرا این گستره‌ای است که معمولا الاستومرها درآن به‌کار می‌روند.

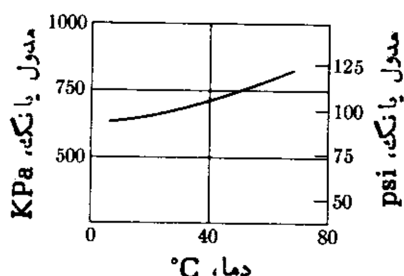
مــولکولهای لاستیك توسط محدودشدن چرخش پیوند کــه موجب گره‌خوردگی می‌شود کشیده‌می‌شوند. حال اگر یك‌نوار لاستیکی کشیده‌شده گرم شود آشفتگی گرمایی، چرخشی و نیروهای منقبض‌کننده افزایش مــی‌یابد اگر نیروی واردشده تغییر نکند نوار




شکل ۷ـ۵ـ۱ مــنحنــی تنش - کــرنش (لاستیك). با بازشدن گره‌خوردگی‌مولکولها، به‌تدریج‌شیب‌منحنی (مدول کشسانی) افزایش می‌یابد. (درمورد فلزات، به‌شکل ۱ـ۲ـ۱ رجوع کنید.)

---

* هرگاه‌لاستیك‌کشیده‌نشده درنیتروژن‌مایع (C° ۱۹۶ـ یا K۷۷) قرارگیردمانند شیشه شکسته می‌شود. $T_g$ برای لاستیکهای معمولی در حدود C°۷۵ـ یا K ۲۰۰ است.

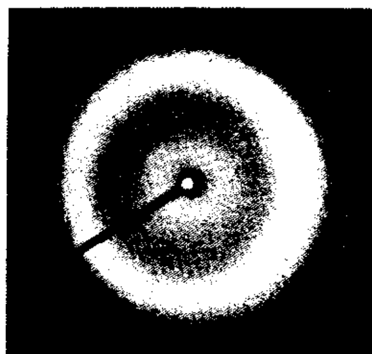


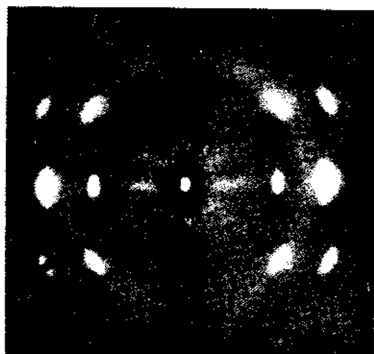

**شکل ۷ـ۵ـ۲** مدول یانگ برحسب دما (لاستیك کشیده شده). با افزایش آشفتگی گرمایی، نیروهای منقبض‌کنندهٔ گره‌خوردگی، بزرگتر می‌شوند. بنابراین مدول کشسانی دما افزایش می‌یابد. (بهشکل ۶ـ۳ـ۳ رجوع کنید.)

منقبض می‌شود. بنابراین لاستیك کشیده شده دارای ضریب انبساط گرمایی «منفی» است و مدول یانگ با دما افزایش می‌یابد (شکل ۷ـ۵ـ۲).*

بالاخره، درپلی مری‌که تغییرشکل آن به‌طوری است که مولکولهایش دریك‌امتداد قرار گرفته‌اند تبلور جزئی آسانتر اتفاق می‌افتد. مثلا لاستیك معمولا کاملا بی‌شکل و نابلورین است، اما براثر نیروی‌کششی مولکولهای آن جهتگیری موازی می‌یابند. این موضوع‌را می‌توان با تفرق اشعهٔ X (شکل۷ـ۵ـ۳) نشان‌داد؛ این‌کشیدگی به‌مولکولهای جهت گرفتهٔ مجاور امکان ایجاد آرایهٔ بلورین را می‌دهد. با بلورنگاری می‌توان لکه‌های حاصل ازتفرق درشکل ۷ـ۵ـ۳ (ب) را به‌امتداد مولکولی مربوط‌کرد. اگر تنش‌برداشته و لاستیك جمع شود، نقاط تفرق ناپدید می‌شوند.

**تغییرشکل ویسکوز.** تنش برشی موجب جریان یافتن مایع می‌شود. سرعت جریان به‌عکس ویسکوزیته بستگی دارد. بسیاری از پلاستیکها بین دمای شیشه‌ای و دمای ذوب به‌صورت


(الف)

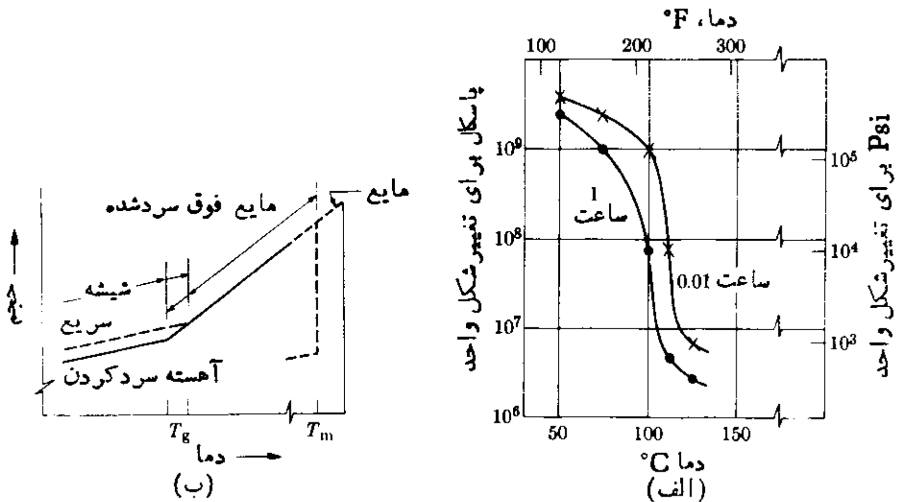

(ب)

**شکل ۷ـ۵ـ۳** تبلور ناشی از تغییرشکل لاستیك طبیعی (پلی‌ایزوپرن) که با تفرق اشعهٔ x آشکار شده‌است. الف) کشیده نشده؛ ب) کشیده شده.

* این جمله‌فقط درمورد لاستیکهای کشیده شده صادق است.

مایع فوق‌سرد‌ند. [شکل۷ـ۵ـ۴ (ب)]، و‌درنتیجه علاوه برتغییرشکل کشسان‌تحت‌جریان ویسکوز نیز قرار دارند. ازآنجاکه ویسکوزیته، $\eta$، معمولاً بالاست، سرعت‌جریان ممکن است کم باشد. با این‌حال حتی درسرعتهای کم، اگر پلی‌مر مدت زیادی تحت‌نیرو قرار گیرد تغییرشکل به‌وجود می‌آید. همچنین در دماهای بالا تولید پلاستیك را بـا‌تغییرشکل درون قالب میسر می‌سازند.

شکل ۷ـ۵ـ۴ (الف) تنش بـرشی، $\tau$، لازم برای یك واحـد (۱۰۰٪) تغییرشکل پلی‌متیل‌متاکریلیت (PMM)* را به‌صورت‌تابعی‌از دما نشان‌می‌دهد آشکار است که‌اندکی بالای $100°C$ تفاوت محسوسی‌ظاهرمی‌شود این‌همان دمای‌شیشه‌ای $T_g$ شکل۷ـ۵ـ۴(ب) است. قبلا گفته شدکه بالای دمای شیشه‌ای مولکولها آزادندکه به‌وسیلهٔ آشفتگی گرمایی خم‌شده و گره بخورند. پایینتراز این دما برای نوآرایی مولکولها و فشردگی بیشترآنها آشفتگی گرمایی کافی نیست، و بنابراین در رفتارگرمایی مـاده انفصالی مشاهده می‌شود. درشکل ۷ـ۵ـ۴ (الف) دیده می‌شود که تنش لازم برای تغییرشکل، در دمای شیشه‌ای تا بیش‌از صدبرابر تغییر می‌کند واضح است که دمای شیشه‌ای در رفتارپلی‌مرها دمای بسیار مهمی است.




**شکل ۷ـ۵ـ۴** مـدول ویسکوالاستیك (محور عمودی) برحسب دمـا (پلی‌متیل‌متااکریلیت، PMM). الف) برای یك‌واحدتغییرشکل در دمای معین، هرچه زمان بیشتر باشد تنش کمتری لازم است در دمای شیشه‌ای کاهش قابل‌ملاحظه‌ای در مدول، $M_{ve}$، به‌وجـود می‌آید؛ ب) هرچه آهسته‌تر سرد شود دمای شیشه‌ای کمتر است، زیرا زمان بیشتر به‌مولکولها امکان می‌دهد که خود را با افزایش تنش تطبیق دهند.

* با نام تجارتی Lucite. ترکیب‌آن درجدول ۷ـ۲ـ۱ آمده است.

دومنحنی شکل ۷ـ۵ـ۴ (الف) نشان می‌دهندکه با افزایش زمان از ۳۶ ثانیه (۱٪ ساعت) تا ۱ ساعت تنش لازم برای تغییرشکل معین کمتر خواهد بود. این دو منحنی همچنین‌نشان می‌دهندکه باافزایش زمان از ۱٪ تا ۰ر۱ ساعت، دمای شیشه‌ای تقریباً $10^\circ C$ کاهش می‌یابد. این تغییر در شکل ۷ـ۵ـ۴ (ب) به‌صورت تغییر در دمای انتقال شیشه‌ای ناشی ازسردکردن آهسته‌تر منعکس شده‌است. اگر سرعت سردکردن کمتر باشد مولکولها فرصت بیشتری‌برای نوآرایی خواهندداشت و تا دمای‌پایینتر این‌کار را ادامه خواهندداد.

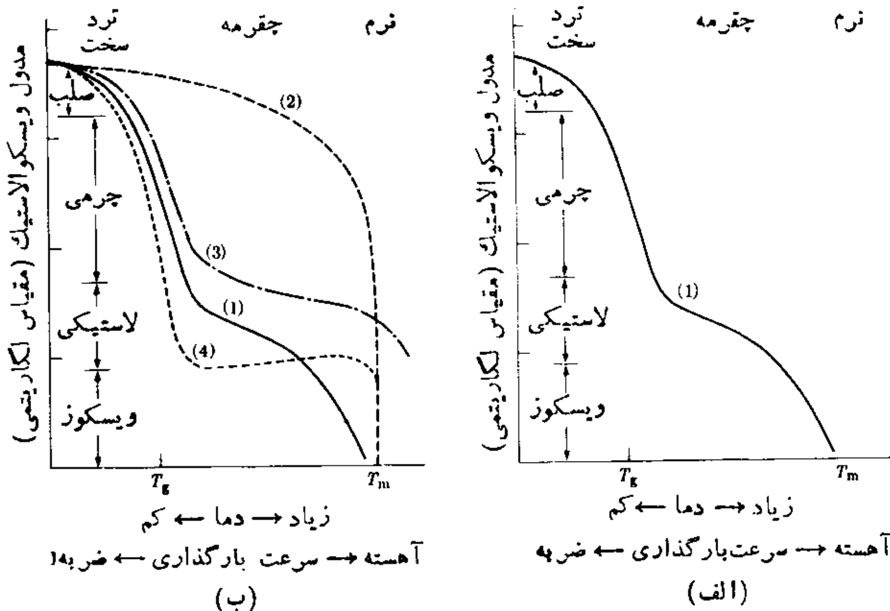
ساختارهای مولکولی مختلف و اثر آنها را روی تغییرشکل می‌توان باهم مقایسه کرد. در شکل ۷ـ۵ـ۵ محور عمودی، مدول ویسکوالاستیك ($M_{ve}$) را نشان می‌دهد.

$$M_{ve}=\frac{\tau}{\gamma_e+\gamma_f} \qquad (۷-۵-۱)$$

در اینجا نیز مانند فصل ۶، $\tau$ تنش برشی، $\gamma$ تغییرشکل برشی، $\gamma_e$ تغییرشکل کشسان و $\gamma_f$ تغییرمکان به‌وسیلهٔ جریان ویسکوز است. محور افقی تعمیم داده شده است، به‌طوری‌که انتهای راست آن، دمای بیشتر و یا زمان طولانیتر را نشان می‌دهدکه هردو تغییرشکل را زیاد می‌کنند (و درنتیجه $M_{ve}$ را کم می‌کنند). در انتهای چپ شکل ۷ـ۵ـ۵ (الف) و زیر دما شیشه‌ای $T_g$ که تنها تغییرشکل کشسان میسر است ماده نسبتاً صلب است، نمونهٔ آن گونیایی است که برای نقشه‌کشی به‌کار می‌رود. در گسترهٔ دمای شیشه‌ای ماده چرم‌مانند است در این حالت قابل‌تغییرشکل و حتی تاکردن است ولی بلافاصله به‌شکل اولیه‌اش برنمی‌گردد، در ناحیهٔ لاستیکی تغییرشکل پلی‌مرها به‌راحتی اتفاق می‌افتد ولی بعداز برداشتن تنش پلاستیك سریعاً به‌شکل قبلی برمی‌گردند توپ لاستیکی و بطری پلی‌اتیلنی فشاری مثالهایی عالی از این رفتارند زیرا هم نرم وهم بسیار کشسان‌اند. در دماهای باز هم بالاتر یاتحت بارهای مداوم، جریان ویسکوز تغییرشکل زیادی در پلی‌مر ایجادمی‌کند.

قسمت‌دوم شکل ۷ـ۵ـ۵ چگونگی تغییرشکل‌را همانگونه که برای پلی‌مر بی‌شکل بیان شد، برای ساختارهای مختلفی که قبلا ذکرشد مقایسه می‌کند. مواد پلی‌مری کاملا بلورین (منحنی ۲) دمای شیشه‌ای ندارند. در نتیجه با افزایش دما به‌تدریج نرم می‌شوند. تا درحوالی نقطهٔ ذوب که جریان سیال اهمیت می‌یابد. پلی‌اتیلنهایی که چگالی بیشتری دارند (جدول۷ـ۳ـ۱) بین‌منحنیهای (۱) و (۲) واقع‌می‌شوند زیرا تقریباً ۵۰٪ بلورینگی دارند.

منحنی (۳) شکل ۷ـ۵ـ۵ رفتار پلی‌مرهایی را نشان می‌دهد که اتصال متقاطع دارند. مثلا لاستیك وولکانیده سخت‌تر از غیر وولکانیده است. هرچه کسر بیشتری از اتصالات‌متقاطع ممکن، به‌هم‌متصل‌شوند منحنی (۳) بالاتر خواهد رفت. شایان توجه‌است که اثر اتصال متقاطع تا بعداز نقطهٔ ذوب در مایع واقعی وجود دارد. در این‌مورد پلی‌مر مشبکی مانند فنل ـ فرم آلدئید (شکل ۷ـ۴ـ۲) را می‌توان به‌عنوان ماده‌ای که اتصالات متقاطع بسیار زیادی دارد به‌شمار آورد و گرما سخت بودن آن را ناشی از ساختار




**شکل ۷-۵-۵** مدول ویسکوالاستیک برحسب ساختار مولکولی. ۱) پلی‌مر بی‌شکل خطی؛ ۲) پلی‌مر بلوری؛ ۳) پلی‌مر با اتصالات متقاطع؛ ۴) الاستومر (لاستیک).

سه‌بعدی و غیر بلوری آن دانست که تا بالای نقطهٔ ذوب مفروض وجود دارد.

وقتی دما از دمای شیشه‌ای تجاوز کند مولکولهای الاستومری می‌توانند دوران یافته و گره‌خوردگیها را باز کنند تا کرنش قابل توجهی به‌وجود آید. با برداشتن تنش مولکولها دوباره سریعاً صورت‌بندی گره‌خوردهٔ خود را می‌یابند (شکل ۷-۱-۷)، و این تمایل به گره‌خوردگی در دماهای بالاتر که آشفتگی گرمایی بزرگتری وجود دارد افزایش می‌یابد. بدین ترتیب منحنی (۴) در ناحیهٔ لاستیکی به‌طرف راست کشیده شده است. [شکل ۷-۵-۵ (ب)] البته الاستومر سرانجام به‌دمایی می‌رسد که مایع واقعی باشد و در آن حال سریعاً جریان خواهد یافت.

☐ **افت تنش.** در بحث شکل ۷-۵-۵ فرض براین بود که تنش ثابت است و کرنش افزایش می‌یابد. در مواردی نیز کرنش ثابت است. از آنجا که جریان ویسکوز انجام می‌گیرد تنش کم می‌شود. این پدیده را می‌توان هنگام بازکردن نوار لاستیکی که مدتی دور یک کتاب یا یک‌دسته کاغذ به‌صورت کشیده شده قرار داشته مشاهده کرد. طول لاستیک به‌اندازهٔ اولیه برنمی‌گردد، و به‌این دلیل کاغذها را کاملا مثل اول محکم نگه‌نمی‌دارد زیرا مقداری از تنش در آن ازبین رفته است.

در مادهٔ ویسکوالاستیک که تحت کرنش ثابت است تنش کم می‌شود زیرا مولکولها

به‌تدریج هریك به‌وسیلهٔ دیگری جریان خواهند یافت. سرعت‌کاهش تنش $(-ds/dt)$ با تراز تنش متناسب است

$$\left(-\frac{ds}{dt}\right)\tau = s \qquad (۷-۵-۲)$$

پس‌از جابه‌جایی و انتگرال‌گیری

$$\frac{ds}{s} = -\frac{dt}{\tau} \qquad (۷-۵-۳\text{، الف})$$

$$\ln\frac{s}{s_0} = -\frac{t}{\tau}$$

$$s = s_0 e^{-t/\tau} \qquad (۷-۵-۳\text{، ب})$$

نسبت‌تنش، $s/s_0$ بین‌تنش درزمان $t$ و تنش‌اولیه $s_0$ در $t_0$ است. ثابت‌تناسب $\tau$ در رابطهٔ (۷-۵-۲) باید واحد زمان داشته باشد و زمان افت نام دارد، وقتی $t = \tau$ باشد $s/s_0 = 1/e =$ ۰٫۳۷ خواهد بود.

چون افت تنش نتیجهٔ حرکات مولکولی است می‌توان گفت‌که اثر دما روی‌آن‌شبیه اثر دما روی‌نفوذ است. از آنجا که زمان‌افت عکس سرعت است

$$\frac{1}{\tau} \propto e^{-E/kT} \qquad (۷-۵-۴)$$

یا مانند رابطهٔ (۴-۷-۴)

$$\ln\frac{1}{\tau} = \ln\frac{1}{\tau_0} - \frac{E}{(1.38 \times 10^{-24}\ \mathrm{J/K})(T)} \qquad (۷-۵-۵)$$

دراین رابطه‌ها $E$، $k$ و $T$ همان معانی و واحدهای رابطهٔ (۴-۷-۴) را دارند. $1/\tau$، مثل $D$ در واحد خود $\sec^{-1}$ دارد، زیرا هردو سرعت را دربر می‌گیرند.

**مثال ۷-۵-۱** نمونه‌ای از جهتگیری مولکولهای لاستیك را به‌وسیلهٔ تغییر دما بیان‌کنید.

جواب: این آزمایش ساده را می‌توانید با نوار ضخیم و شکل‌پذیر لاستیکی انجام دهید. ازلب خود می‌توانید به‌عنوان نوعی دماسنج استفاده‌کنید. نوار لاستیکی را با لب پایینی خود درتماس قراردهید وسریعاً آن را بکشید، سپس به‌سرعت (بدون رها کردن) آن را به‌طول اولیه‌اش برگردانید. این‌عمل را چندبار تکرار کنید. باکمی دقت متوجه خواهید شدکه هنگام‌کشیدن دما زیاد و به‌محض آزادکردن کم می‌شود. تغییرات دما به این‌دلیل است‌که‌هنگام تغییرجهتگیری مولکولها، گرمای ذوب‌آزاد شده از لاستیك به‌لب

شما منتقل می‌شود، و هنگام برداشتن تنش که جهتگیری مولکولها بههم می‌خورد انرژی به‌صورت آنتروپی جذب می‌شود.

□ **مثال ۷-۵-۲** تنش ۱۱ MPa لازم است تا طول يك‌نوار لاستیکی ۱۰۰ میلی‌متری به ۱۴۰ میلی‌متر برسد. پس‌از ۴۲ روز در دمای ۲۰ °C درهمان‌شرایط کشیده شده، لاستیك فقط تنشی برابر با ۵٫۵ MPa اعمال می‌کند. الف) زمان افت چقدر است؟ ب) پس‌از ۹۰ روز و تحت‌همان شرایط چه‌تنشی به‌وسیلهٔ نوار اعمال خواهد شد؟

حل: الف) از رابطهٔ (۷-۵-۳، الف)

$$\ln\frac{۵٫۵}{۱۱}=-\frac{۴۲}{\tau}$$

$$\tau=۶۱ \text{ روز}$$

ب) از رابطهٔ (۷-۵-۳، ب)

$$s_{۹۰}=۱۱e^{-۹۰/۶۱}$$

$$=۲٫۵\text{MPa} \quad (\text{یا } ۳۶۰ \text{ psi})$$

راه‌حل دیگر قسمت (ب)، با ۴۸ روز اضافی

$$s_{۴۸}=۵٫۵e^{-۴۸/۶۱}=۲٫۵ \text{ MPa}$$ ▲

□ **۷-۵-۳** درمثال ۷-۵-۲، زمان‌افت برای نوارلاستیکی در ۲۵ °C برابر با ۵۰روز است. پس‌از ۳۸ روز در ۳۰ °C نسبت تنش، $s/s_\circ$ چقدر خواهد بود؟

حل: در ۲۰°C، زمان‌افت ۶۱ = $\tau$ روز است. با استفاده‌از رابطهٔ (۷-۵-۵)داریم

در ۲۰°C

$$\ln\frac{۱}{\tau_\circ}=\ln\frac{۱}{۶۱}+\frac{E}{(۱۳٫۸\times ۱۰^{-۲۴}\,\text{J/K})(۲۹۳\,\text{K})}$$

در ۲۵°C

$$\ln\frac{۱}{\tau_\circ}=\ln=\frac{۱}{۵۰}+\frac{E}{(۱۳٫۸\times ۱۰^{-۲۴}\,\text{J/K})(۲۹۸\,\text{K})}$$

ازحل این دو رابطه داریم

$$E=۴٫۸\times ۱۰^{-۲۰}\,\text{J}$$

$$\ln\frac{۱}{\tau_\circ}=۷٫۷۶$$

در $۳۰°C$

$$\ln\frac{۱}{\tau}=\frac{۷٫۷۶-۴٫۸\times ۱۰^{-۲۰}\,J}{(۱۳٫۸\times ۱۰^{-۲۴}\,J/K)(۳۰۳\,K)}$$

$$\tau = ۴۱ \text{ روز}$$

$$s_{۳۸}=s_{۰}e^{-۳۸/۴۱}$$

$$s_{۳۸}/s_{۰}=۰٫۴$$

توضیح. زمان افت در دماهای بالا کم می‌شود.

لاستیك وقتی تحت‌تنش است بیشتر در معرض اکسایش قرار دارد. در این حالت ساختار اصلاح می‌شود و تغییرات دیگری مانند سخت‌شدن یا ترك‌خوردن مشاهده می‌شود.▲

## ۶-۷ رفتار الکتریکی پلی‌مرها

پلی‌مرها غالباً به‌عنوان عایق الکتریکی به‌کار مـی‌روند، و مزیتهای آشکاری دارند، آنها می‌توانند صلب یا خمش‌پذیر باشند. مـی‌توان آنها را به‌صورت فیلم نازکی درآورد، و حتی به‌صورت مایع به‌کاربرد و در محل پلی‌مری می‌شوند مثلا دور یك‌سیم الکتریکی. یا به‌عنوان ترکیب پوششی پس‌از سوارکردن دستگـاه. نکتهٔ مهم این است کـه پیوندهـای کووالانس در تمام پلی‌مرها معمولا رسانش الکتریکی را محدود می‌کنند.

☐ **رسانش.** باآنکه پلی‌مرها ذاتاً عایق‌اند، ترکیب آنها را می‌توان چنان تنظیم کرد که مقداری‌رسانندگی‌داشته باشند. در لاستیکهای‌ویژه‌ای باافزودن‌گرد ریز گرافیت که‌مسیری برای‌حرکت الکترونها فراهم‌می‌آورد رسانندگی‌به‌وجودمی‌آید. بنابراین این رسانندگی از ساختار پلی‌مر نیست بلکه به‌دلیل وجود ذرات هادی فاز ثانویه‌ای حاصل شده است.

همچنین طبیعت‌سیگنالهای‌الکتریکی‌را از قرارمعلوم به‌وسیلهٔ‌رسانندگی درسلولهای عصبی‌کـه البته ساختار مـولکولی دارند، تولید می‌کند. می‌توان از الکترونهای آزادی صحبت‌کردکه درچنین مسیرهای مولکولی در سلولهای عصبی حرکت می‌کنند. با این‌حال هنوز دانشمندان مکانیسم آن را تاحدی تحلیل نکرده‌اند که بتوانند به‌طور مصنوعی آن را به‌وجودآورند و این در مهندسی و علم‌مواد تحت مطالعه است.

**ثابت دی‌الکتریك.** پلی‌مرهادارای‌بارالکتریکی، به‌صورت‌هستهٔ‌اتم، الکترون، وگروههای قطبی‌اند. این بارها به‌میدان الکتریکی پاسخ می‌دهند و با آنکه نمی‌توانند مولکول مادر خود را ترك‌کنند ولی‌مراکز حرکت‌خود را به‌اندازهٔ $d$ به‌سمت‌جهت‌مثبت میدان‌الکتریکی تغییرمکان‌می‌دهند. پروتونهای اتمهای‌هیدروژن نیز مرکز ارتعاش خود را به‌طرف‌الکترود

منفی انتقال می‌دهند. گروههای قطبی (بخش ۷-۳) و مولکولهای قطبی (بخش ۲-۴) با میدان‌هم‌امتداد می‌شوند. بنا براین ثابت دی‌الکتریك نسبی، $\kappa$، پلاستیکها بزرگتر از واحد است (جدول۷-۶-۱).

جابه‌جا شدن بارهای، $Q$، به‌این‌ترتیب، موجب «قطبش» $\mathcal{P}$ ماده می‌شود. قطبش $\mathcal{P}$ عبارت از مجموع گشتاورهای دوقطبی، $\sum Qd$ در واحد حجم است

$$\mathcal{P}=\frac{\sum Qd}{V} \qquad (۷-۶-۱)$$

مقدار قطبش که به‌ساختار ماده بستگی دارد روی چگالی‌بار، $\mathcal{D}$، ($cm^2$/ کولن) که یك خازن‌می‌تواندذخیره کنداثردارد. بنا براین درشکل ۱-۴-۱ (الف) هنگامی که‌بین‌صفحات خازن خلأ* باشد بار $\mathcal{D}_0$ در آن‌ذخیره می‌شود که بامیدان‌الکتریکی $\mathcal{E}$ متناسب است (رابطهٔ ۱-۴-۵). در صورتی که بین صفحات ماده‌ای وجود داشته باشد، چگالی بار به $\mathcal{D}_m$

**جدول ۷-۶-۱** ثابت دی‌الکتریك نسبی برای پلی‌مرها (دما، در غیراز مواد ذکر شده، $20\ ^\circ C$ است).

| | در $60\ Hz$* | در $10^6\ Hz$ |
|---|---|---|
| نایلون ۶/۶ | ۴٫۰ | ۳٫۵ |
| پلی اتیلن، PE | ۲٫۳ | ۲٫۳ |
| پلی‌ترافلوئوروانیلن، PTFE | ۲٫۱ | ۲٫۱ |
| پلی‌استیرن، PS | ۲٫۵ | ۲٫۵ |
| پلی‌وینیل کلرید | | |
| پلاستیکی شده ($T_g\approx 0^\circ C$)** | ۷٫۰ | ۳٫۴ |
| صلب ($T_g\approx 85^\circ C$) | ۳٫۴ | ۳٫۴ |
| لاستیك ($T_g\approx 0^\circ C$ ،۱۲ w/oS) | | |
| $-25^\circ C$ | ۲٫۶ | ۲٫۶ |
| $+25^\circ C$ | ۴٫۰ | ۲٫۷ |
| $+50^\circ C$ | ۳٫۸ | ۳٫۲ |

* Hz=چرخه در ثانیه.

** $T_g$=دمای شیشه‌ای.

($=\kappa\mathcal{D}_\circ$) افزایش مـی‌یابد. این چگالی بار افزوده شده، راه‌دومی برای تعریف قطبش $\mathcal{P}$ یك ماده است

$$\mathcal{P}=\mathcal{D}_m-\mathcal{D}_\circ \qquad (۷-۶-۲)$$

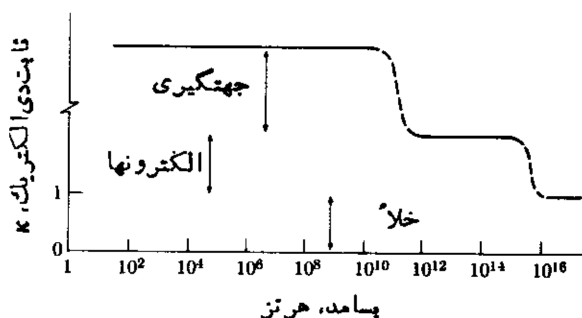
یا، با استفاده از روابط (۱-۴-۵) و (۱-۴-۶)

$$\mathcal{P}=(\kappa-1)\epsilon_\circ\mathcal{E} \qquad (۷-۶-۳)$$

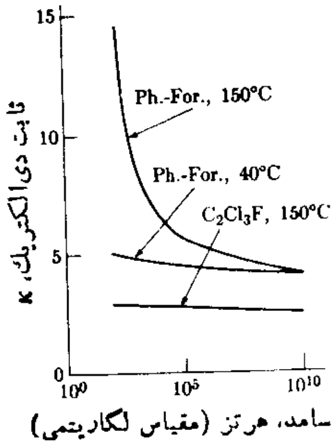
که درآن $\kappa$ ثابت دی‌الکتریك نسبی و $\epsilon_\circ$ برابر با $۸٫۸۵\times۱۰^{-۱۲}\,C/V\cdot m$ است؛ ثابت تناسب، نفوذپذیری فضای آزاد نامیده مـی‌شود. میدان الکتریکی $\mathcal{E}$ گرادیان ولتاژ، $E/d$، است.

در گسترهٔ بسامدهای $۱۰^{۱۲}$ تا $۱۰^{۱۵}$ هرتز، قطبش $\mathcal{P}$ تنها به‌دلیل جابه‌جاشدن الکترونهاست زیرا فقط الکترونهامی‌توانند به‌میدان الکتریکی $\mathcal{E}$ سریعاً پاسخ بدهند. دربسامدهای کمتر، $\sim۱۰^{۱۰}Hz$، در ماده‌ای مانند نایلون، ابتدا از سوی پروتونهای اتمهای هیدروژن طرفین و بعداز گروه قطبی $>C=O$ پاسخهایی دیده‌می‌شود. دوقطبی اخیر در این‌میدان‌جهتگیری می‌کند. زیرا اکسیژن بارمنفی اضافی را به‌صورت جفت‌الکترونهای‌تنها حمل می‌کند. هم پروتونها وهم‌اکسیژنها برای‌جهتگیری دوقطبی به‌تحرك‌اتمها در داخل ماده احتیاج‌دارند. البته فقط‌بالای دمای شیشه‌ای، $T_g$، این‌عمل صورت می‌گیرد. شکل ۷-۶-۱ طرحوارهٔ اثر قطبش $\mathcal{P}$ را برثابت دی‌الکتریك نسبی $\kappa$ به‌صورت تـابعی از بسامد نشان مـی‌دهد. شکل ۷-۶-۲ داده‌های مربوط به‌دو جامد آلی معمولی را نشان می‌دهد.

زیر $T_g$، حرکت مولکولی به‌ثابت دی‌الکتریك مربوط نمی‌شود. به‌محض افزایش $T_g$، ثابت دی‌الکتریك‌طبق‌شکل ۷-۶-۳ تاحدقابل‌ملاحظه‌ای‌افزایش‌می‌یابد. ولی‌در دماهای




**شکل ۷-۶-۱** ثابت دی‌الکتریك نسبی برحسب بسامد (طرحواره). الکترونها دربسامدهای کمتراز $۱۰^{۱۵}$ هرتز و دو قطبیهای مولکولی در کمتراز $۱۰^{۱۰}$ هرتز می‌توانند به‌میدان الکتریکی متناوب پاسخ دهند.

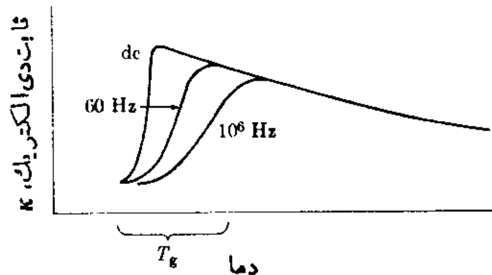



**شکل ۷ـ۶ـ۲** ثابت دی‌الکتریک برحسب بسامد. به‌طورکلی بسامد بالاتر و دمای پایینتر موجب کاهش ثابت‌دی‌الکتریک‌می‌شود زیرا زمان برای ردیف شدن دو قطبیها کافی نخواهد بود. (Ph–For = فنل‌فرم‌آلدئید، $C_2Cl_3F$ = پلی‌تری‌کلروفلوئورواتیلن.)

بالاتر کاهشی در ثابت دی‌الکتریک مشاهده می‌شود، زیرا آشفتگیهای شدیدتر گرمایی جهتگیری دوقطبیهای مولکولی را ازبین می‌برند.

منحنیهای شکل ۷ـ۶ـ۳ نقاط دیگری را نیز نشان می‌دهند. دمای شیشه‌ای $T_g$ با بسامد تغییر می‌کند. درست مانند شکل ۷ـ۵ـ۴ زمان زیاد (در این‌مورد چندمیلی ثانیه برای 60 Hz درمقابل‌چند میکروثانیه برای $10^6$ Hz) موجب حرکت مولکولی درهمین دمای پایین می‌شود. میدان dc حتی $T_g$ کمتری دارد زیرا برای جهتگیری مولکولی زمان زیادی در دسترس است.

**مثال ۷ـ۶ـ۱** پلی‌استیرن وقتی در میدان dc قرار می‌گیرد دارای‌ثابت دی‌الکتریک نسبی




**شکل ۷ـ۶ـ۳** ثابت دی‌الکتریک برحسب دما. پایینتر از دمای‌شیشه‌ای $T_g$، دو قطبیهای مولکولی نمی‌توانند به‌میدان الکتریکی متناوب پاسخ دهند (دمای‌شیشه‌ای دربسامدهای پایین‌کمتر است) [شکل۷ـ۵ـ۴(ب)]. بالای $T_g$ آشفتگی گرمایی قطبش را ازبین می‌برد و ثابت دی‌الکتریک، κ، را کاهش می‌دهد.

۵ر۲ است. قطبش درون PS را وقتی که ورق ۵ر۰ میلی‌متری بین ۱۰۰ ولت قرارمی‌گیرد حساب کنید.

حل: میدان $۲ \times ۱۰^{۵} V/m$ است. از رابطهٔ (۷-۶-۳)

$$\mathcal{P} = (۲٫۵ - ۱)(۸٫۸۵ \times ۱۰^{-۱۲} C/V \cdot m)(۲ \times ۱۰^{۵} V/m)$$
$$= ۲٫۷ \times ۱۰^{-۶} C/m^{۲}$$

توضیح. ازآنجا که بار الکترون $۱۶ر۰ \times ۱۰^{-۱۸} C$ است، این قطبش معادل $۱٫۷ \times ۱۰^{۲} el/mm^{۲}$ است. ▲

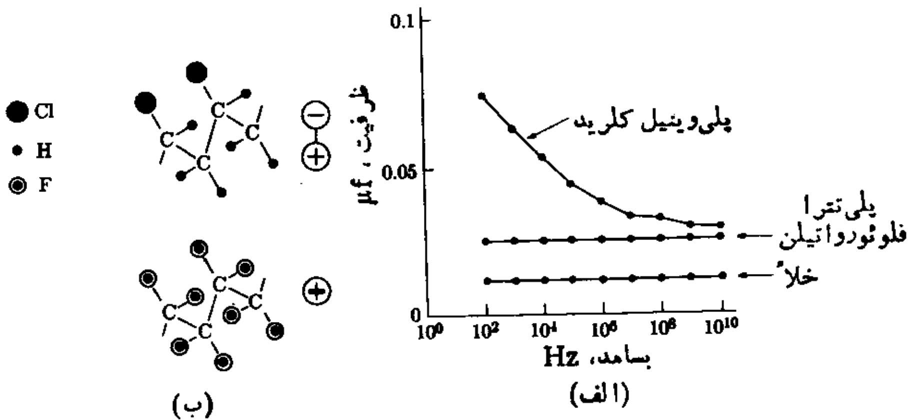
**مثال ۷-۶-۲** ظرفیت خازنی باصفحات موازی را می‌توان از رابطهٔ (۱-۲-۷) محاسبه کرد. ثابت دی‌الکتریک نسبی برای پلی‌وینیل کلرید (PVC) و پلی‌ترافلوئورواتیلن (PTFE) به‌قرار زیر است

| بسامد، هرتز | PVC | PTFE |
|---|---|---|
| $۱۰^{۲}$ | ۶ر۵ | ۲ر۱ |
| $۱۰^{۳}$ | ۵ر۶ | ۲ر۱ |
| $۱۰^{۴}$ | ۴ر۷ | ۲ر۱ |
| $۱۰^{۵}$ | ۳ر۹ | ۲ر۱ |
| $۱۰^{۶}$ | ۳ر۳ | ۲ر۱ |
| $۱۰^{۷}$ | ۲ر۹ | ۲ر۱ |
| $۱۰^{۸}$ | ۲ر۸ | ۲ر۱ |
| $۱۰^{۹}$ | ۲ر۶ | ۲ر۱ |
| $۱۰^{۱۰}$ | ۲ر۶ | ۲ر۱ |

الف) ظرفیت را برحسب بسامد برای سه‌خازن با صفحاتی که مساحت مؤثر آنها $۱۰۲ cm \times ۱ر۳ cm$ است و به‌فاصلهٔ ۲۵ر۰ mm ازیکدیگر قرار دارند برای (۱) خلأ؛ (۲) PVC؛ و (۳) PTFE رسم کنید.

ب) کاهش ثابت دی الکتریک PVC و ثابت ماندن ثابت دی الکتریک PTFE را نسبت به افزایش بسامد توضیح دهید.

حل: الف) محاسبهٔ نمونه برای $۱۰^{۲}$ چرخه برثانیه




**شکل ۷-۶-۴** ظرفیت برحسب‌بسامد. الف) به‌مثال ۷-۶-۲ مراجعه‌کنید؛ ب) تقارن مرهای پلی‌وینیل‌کلرید و پلی‌ترا فلوئوروواتیلن.

$$C_{vac}=\frac{(۱)(۸٫۸۵\times ۱۰^{-۱۲}C/V\cdot m)(۰٫۰۳۱m)(۱٫۰۲\,m)}{۲۵\times ۱۰^{-۶}m}=۰٫۰۱۱۲\,\mu f$$

$$C_{pvc}=(۶٫۵)(۰٫۰۱۱۲\,\mu f)=۰٫۰۷۳\mu f$$

بقیهٔ نتایج درشکل ۷-۶-۲ (الف) دیده می‌شود.

ب) ثابت‌دی‌الکتریک‌نسبیPVC در بسامدهای پایین زیاداست زیراPVC دارای مری نامتقارن با گشتاور دوقطبی زیاد است. [شکل ۷-۶-۴ (ب)]. در بسامدهای بالا دوقطبیها نمی‌توانند درمیدان متناوب ردیف‌شده باقی بمانند. ازطرف‌دیگرPTFEمر متقارنی دارد، و قطبش آن تنهاالکترونی است. با آنکه دوقطبیها در PTFE ضعیفترند ولی در بسامدهای مختلف شکل ۷-۶-۴ می‌توانند نوسان کنند. ▲

## ۷-۷ □ پایداری پلی‌مرها

پلی‌مرها به‌وسیلهٔ تغییرشکل ویسکوالاستیک تغییرشکل می‌یابند (بخش ۷-۵). اگرچه تغییر شکل با افزایش دما در بالای $T_g$، شتاب‌پیدا می‌کند؛ این نرم‌شدن، پیوندهای کووالانس اولیهٔمولکول را نمی‌شکند. اگرچه تحت‌شرایط شدیدتری، این پیوندها ممکن‌است شکسته شوند. البته‌هرتغییری‌که در ساختار به‌وجود آید برخواص آن تأثیر می‌کند. گرمای زیاد می‌تواند پیوندها را بشکند و موجب تجزیهٔ پلی‌مر شود. محیطهای اکسیدکننده باعث تغییرات شیمیایی می‌شوند. سرانجام تشعشع موجب تجزیه و دربرخی شرایط موجب شاخه‌ای شدن یا اتصال متقاطع می‌شود.

**تجزیه شدن.** معمولیترین نوع تجزیه در پلی‌مرهـا، زغال‌شدن آنهاست. اگر رادیکالهای طرفین و اتمهـای هیدروژن یك پلی‌مر وینیل (جدول ۷ـ۲ـ۱) به‌وسیلهٔ آشفتگی گرمایی واقعاً جـدا شوند فقط ستون اتمهـای کربن باقی مـی‌ماند. این موضوع را مـی‌توان در کربوهیدراتهای نان برشته‌شده یا درچوب زغال شده ملاحظه‌کرد. در محصولات تجارتی معمولا باید ازچنین اتفاقی اجتناب‌شود.* این کربنی شدن در مجاورت هوا تسریع می‌شود، زیرا اکسیژن هوا با اتمهای هیدروژن در طول زنجیر پلی‌مر ترکیب می‌شود.

**اکسایش.** اکسیژن علاوه‌برآنکه تجزیه‌شدن را تسریع مـی‌کند اثرات دیگری نیز دارد. مثلا برخی لاستیکها بـا گوگرد تنها ۵ تا ۲۰ درصد از اتصالات متقاطع ممکن را تشکیل می‌دهند و درنتیجه لاستیك تغییرشکل‌پذیر وکشسان باقی می‌ماند. در یك دوره از زمـان، لاستیك ممکن است به‌کمك اکسیژن هوا اتصالات متقاطع بیشتری تشکیل دهد. حاصل این عمل شبیه به‌شکل ۷ـ۴ـ۴ است. با این‌فرق‌که اکسیژن به‌جای گوگرد برقرارکنندهٔ اتصال است. معمولا باافزایش تعداد اتصالات‌متقاطع لاستیك‌سخت‌تر و شکل‌پذیری آن نیز کمتر می‌شود.

واکنش اکسیدشدنی را که ذکرشد چندعامل تسریع می‌کند:

۱. اکسیژن اگر به‌صورت ازن، $O_3$، باشد به‌مراتب فعالتر از $O_2$ است.

۲. تابش نور فرابنفش مـی‌تواند انرژی لازم برای شکستن پیوندهـای موجود را فراهم‌کند و موجب پیشرفت واکنش اکسایش شود.

۳. پیوندهای موجود در مولکولی‌که تحت تنش باشد آسانتر شکسته می‌شوند.

به‌این دلایل است‌که درساختن تایرماشین غالباً مقداری دودهٔ سیاه یا مواد مشابه دیگری‌که نور را جذب می‌کنند به‌کار می‌رود تـا سرعت اکسایش در محصول کاهش یابد. براساس همین اصول هنگام آزمـایش‌کردن پایداری محصولات، برای تسریع درکار، آنها را در مجاورت ازن یا نور فرابنفش قرار می‌دهند.

**تجزیه تشعشعی.** تابش نـور فرابنفش به‌صورتی کـه ذکرشد و به‌وسیلهٔ نوترون، به‌آسانی پیوند $C-C$ را در پلی‌مر نوع وینیل می‌شکند (شکل ۷ـ۷ـ۱) این عمل‌که مولکولهای کوچکتری تولید می‌کند، تجزیهٔ تشعشعی نـام دارد و خواصی چون استحکام، ویسکوزیته، وغیره را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. شکل ۷ـ۷ـ۲ نشان می‌دهد که ویسکوزیته ذاتی پلی‌مر ذوب شده هنگامی که به‌ملایمت درمعرض $8 \times 10^{17}$ نوترون/$mm^2$ قرار می گیردکاهش می‌یابد.

---

* دربرخی شرایط کنترل‌شده، الیاف گرافیتی ممکن است از الیاف پلی‌مری حاصل شوند و در این‌صورت مواد چندسازه برای استفاده در دمای بالا تقویت می‌شوند.

**شکل ۷-۷-۱** تجزیه‌شدن به‌وسیلهٔ تشعشع (تجزیهٔ تشعشعی پلی‌تترافلوئوروواتیلن). اکثر پلی‌مرها به‌این‌روش‌عمل می‌کنند نه‌مانند شکل ۷-۷-۳. در نتیجه بیشتر پلی‌مرها در اثر صدمات ناشی از تشعشع، استحکام خودرا از دست می‌دهند.



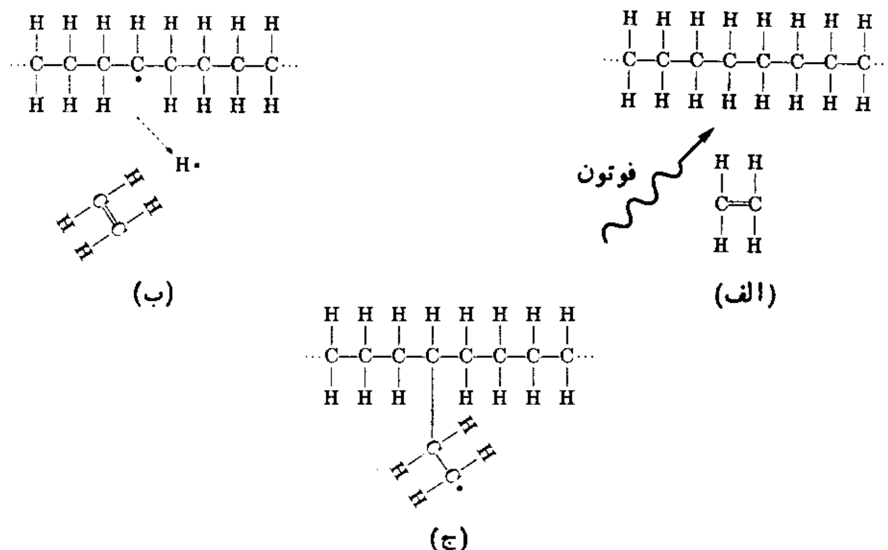
**شکل ۷-۷-۲** تجزیهٔ به‌وسیلهٔ قرارگرفتن در معرض نوترون. چون پلی‌مرها به مولکولهای کوچکتری شکسته‌شده‌اند، ویسکوزیتهٔ آنها کاهش یافته است.

در بعضی حالات (مثلا پلی‌اتیلن) تشعشع موجب شاخه‌ای‌شدن می‌شود. اگر این‌عمل قبل‌از تکمیل پلی‌مر شدن به‌وقوع بپیوندد، ساختاری مانند شکلهای ۷-۲-۵ و ۷-۷-۳ حاصل‌خواهدشد. نتیجهٔ کارروی خواص اثر بسیار مهمی دارد و این درمورد دوجفت‌بطری فشاری درشکل ۷-۷-۴ دیده می‌شود. این‌امرکه آیا تشعشع آثار مطلوب شکل ۷-۷-۴ را دارد یا مانند شکل ۷-۷-۱ زیان‌آور است به‌سادگی قابل پیش‌بینی نیست.

**مثال ۷-۷-۱** لاستیک ایزوپرن تا ۱۰٪ با گوگرد اتصال متقاطع یافته است و در حین‌کار درمحیط اکسیدکننده اتصال متقاطع بیشتری بـا اکسیژن پیدا می‌کند. در این‌حالت ۲٪ به‌وزن آن افزوده می‌شود. چنددرصد از اتصال متقاطع ممکن صورت‌گرفته است؟

حل: مبنا: ۶۸ g ایزوپرن (= ۱ مول)؛ بنابراین ۳۲ گرم گوگرد در ۱۰۰٪.

$$\text{مقدار گوگرد} = ۰٫۱(۳۲\text{g}) = ۳٫۲\ \text{g}$$




**شکل ۷-۷-۳** شاخه‌ای‌شدن به‌وسیلهٔ تشعشع در حین پلی‌مری شدن. فوتون مـی‌تواند انـرژی فعالسازی لازم برای شاخه‌ای‌شدن را تأمین کند. نوترون نیز مـی‌تواند همین اثـر را داشته باشد.

$$۱٫۴۲\,g = (۶۸ + ۳٫۲\,g)\,۰٫۰۲ = \text{اکسیژن گرفته شده}$$

$$\text{مول } ۰٫۰۹ = (۱۶g)/(۱٫۴۲g) = \text{مول اکسیژن}$$

$$\text{(یا ۹٪ از اتصالات ممکن)}\quad ۰٫۰۹ = \text{(مول ایزوپرن)}/\text{(مول ۰٫۰۹)}$$

$$۱۹٪ = (\text{توسط O})۹٪ + (\text{توسط S})۱۰٪ = \text{(کل اتصالات متقاطع)}$$ ▲

**مثال ۷-۷-۲** فـرض‌کنید تمام انرژی لازم برای جـداکردن اتمهای هیدروژن درشکل ۷-۷-۳ به‌وسیلهٔ فوتون تأمین شود (و انرژی گرمایی به‌کـار نیاید). الف) بیشینهٔ طول موجی که می‌توان به‌کاربرد چقدر است؟ ب) چند eV تولید می‌شود؟

حل: الف) ازجدول ۲-۳-۱

$$C-H = \frac{۴۳۵۰۰۰\,J}{۰٫۶ \times ۱۰^{۲۴}\ \text{پیوند}}$$

$$= \frac{۰٫۷۲۵ \times ۱۰^{-۱۸}\,J}{\text{پیوند}}$$



**شکل ۷ـ۷ـ۴** تحت تابش قرارگرفتن پلی‌اتیلن. هرچهار بطری فشاری به‌مدت ۲۰ دقیقه در ۱۲۰ °C (۲۵۰ °F) گرم شده‌اند، ولـی قبل از آن، دوبطـری پشتی تحت اثـر اشعهٔ گامـا قرارگرفته بودند تا شاخه‌ای‌شدن به‌وجود آید (شکل ۷ـ۷ـ۳). بطریهای لـه شده تحت اشعهٔ گاما قرارنگرفته‌بودند. تشعشع زیادی نیز ممکن‌است اثرعکس‌داشته‌باشد وتجزیهٔ تشعشعی‌ایجاد کند (شکل ۷ـ۷ـ۱). اخیراً پلی‌اتیلن با چگالی‌زیاد (HDPE) را چنان‌ساخته‌اندکه برای ضدعفونی، دربرابرآب‌جوش نیز دوام داشته باشد (جدول ۷ـ۳ـ۱).

از رابطهٔ (۲ـ۲ـ۱)

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{(6.62 \times 10^{-34}\ \mathrm{J\ .\ sec})(3 \times 10^{8}\ \mathrm{m/sec})}{0.725 \times 10^{-18}\ \mathrm{J}}$$

$$= 2.740 \times 10^{-7}\mathrm{m} = 274.0\ \mathrm{nm}$$

ب) $\mathrm{eV} = (0.725 \times 10^{-18}\ \mathrm{J}/\text{پیوند})(6.24 \times 10^{18}\ \mathrm{eV/J})$

$$= 4.5\ \mathrm{eV}/\text{پیوند}$$

**توضیح.** این طول موج در ناحیهٔ فرابنفش‌است. طول موجهای کمترازآن فوتونهای پرانرژیتری تولید می‌کنندکه البته بازهم پیوندها را می‌شکنند. ▲

## مرور و بررسی مطالب

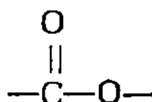
پلاستیکها جامداتی مولکولی‌اند که پلی‌مر نامیده می‌شوند و بنابراین پیوند شیمیایی ذکرشده در بخش ۲ـ۳ اساس ساختار آنها را تشکیل می‌دهد. خواص و رفتار پلاستیکها به‌پاسخ مولکولها درمقابل شرایط گرمایی، مکانیکی و الکتریکی بستگی دارد.

## خلاصه: ساختارهای مولکولی

مولکولها در پلی‌مرها بسیار بزرگ‌اند، هرکدام از آنها واحدهای زیادی دارند و هر واحد، یا مر، آرایش اتمی موجود درکل ساختار مولکولی را دارد. این مرها در سراسر مولکول پلی‌مری تکرار می‌شوند. چون تمام مولکولها مشابه نیستند برای مشخص کردن پلی‌مر، میانگین اندازه‌های مولکولی را محاسبه می‌کنیم. این میانگین می‌تواند براساس جرم مولکولها یا براساس تعداد مولکولها باشد.




گروه‌بزرگی ازپلی‌مرهای نوع افزایشی‌اند که بدون تولید محصول‌فرعی ایجاد می‌شوند. R می‌تواند هرکدام از رادیکالهای جنبی باشد. معمولیترین گروه از پلی‌مرهای نوع تغلیظی، پلی‌استرهایندکه‌حین‌واکنش پلی‌مرشدن‌مولکول‌فرعی کوچکی مانندآب‌واتصالات



تولید می‌کنند. اگر مولکولها دو تابعی باشند، هر دو گروه فوق پلی‌مرهای خطی ایجاد خواهند کرد. مونومرهای چندتابعی (یعنی مولکولهای کوچکی که می‌توانند به‌سه یا چند مولکول دیگر متصل شوند) پلی‌مر مشبك به‌وجود می‌آورند.

کوپلی‌مر در مولکول خود بیش‌از یك‌نوع مر دارد. تغییرات ساختاری‌آن شامل ایزومرهای فضایی (تك‌آرایش، بی‌آرایش) و اصلاحات سیس و ترانس در لاستیك است این آرایشها به‌اضافهٔ تمایل مولکولها برای گره‌خوردگی به‌وسیلهٔ آشفتگی گرمایی، مانع از تبلور می‌شود.

## خلاصه: رفتار مولکولی

رفتار مولکولها، بخصوص مولکولهای بزرگ (ماکرومولکولها) با رفتار اتمهای فلزی متفاوت است. عمده‌ترین مسئله آن است که بسیاری از جامدات ماکرومولکولی ساختار مایعات فوق سرد شده را دارند و بی‌شکل‌اند. در بهترین حالت بلورهایی با عیوب بسیار

ایجاد می‌کنند. ولی مایع فوق سرد شده دمای انتقالی دارد که به‌دمای شیشه‌ای $T_g$ معروف است. پایینتر از $T_g$ ازنوآرایی جلوگیری می‌شود، بالای $T_g$ مولکولها می‌توانند به‌تنشهای مکانیکی و نیروهای میدانهای الکتریکی پاسخ بدهند. پایینتر از $T_g$ پلاستیك صلب و ترد است و ثابت دی‌الکتریك پایینی دارد. بالاتر از $T_g$ پلاستیك خمش‌پذیر است و در دمای بالا و زمان کافی به‌آسانی تغییر شکل می‌یابد. به‌این دلیل تولید آن آسان است، از طرفی هنگام استفاده، محدودیتهایی ازنظر محیطی دارد، با افزایش $T_g$ ثابت دی‌الکتریك زیاد می‌شود زیرا گروههای قطبی برای پاسخ‌دادن به‌میدانهای الکتریکی آزادترند.

پلی‌مرهای خطی گرما نرم‌اند ودر دماهای بالاتر از $T_g$ به‌صورت مایع ویسکوز تغییر شکل می‌یابند. پلی‌مرهای مشبك به‌دما حساسیت کمتری دارند واگر در دماهای بالا، پلی‌مر شدن، اتصال متقاطع، یاشاخه‌ای شدن در آنها ادامه پیدا کند محکمتر خواهند شد.

پلی‌مرها ممکن‌است به‌وسیلهٔ آشفتگی گرمایی زیاد، اکسایش وقرار گرفتن درمعرض اشعه ازهم پاشیده شوند.

## سؤالات تشریحی

۱. توضیح دهید که چرا همیشه «میانگین تعداد» اندازهٔ مولکولی از «میانگین جرمی» اندازهٔ مولکولی کمتراست.

۲. ده‌عدد خلال‌دندان بردارید وآنها را از یك‌سرمیز تا سردیگر آن طوری بچینید که در هر نقطهٔ اتصال زاویهٔ °۱۲۰ وجود داشته باشد قبل‌از گذاشتن هر خلال‌دندان یك‌سکه قرار دهید. خلال دندانهارا طوری قرار دهید که سرآن درطرف راست و دم آن در طرف چپ قرار گیرد. الف) فاصلهٔ دوسرآن چقدر است؟ ب) نتایج به‌دست آمده با نتایج رابطهٔ (۷ـ۱ـ۴) تفاوت دارد چرا؟ (این کار را با کاغذ رسم سه‌محوری نیز می‌توان انجام داد.)

۳. چرا مرهای چندتابعی برای مولکولهای مشبك لازم‌اند؟

۴. ساختار سه مونومر وینیل را رسم کنید. این کار را برای مرهای همین سه‌پلی‌مر وینیل تکرار کنید.

۵. نشان دهید که در پلی‌مرشدن افزایشی پروپیلن ($CH_2CHCH_3$) پیوندها چگونه تغییر می‌کنند.

۶. نشان دهید که در پلی‌مرشدن‌افزایشی بوتادین [$CH_2(CH_2)CH_2$] پیوندها چگونه تغییر می‌کنند.

۷. پراکسید هیدروژن ($H_2O_2$) از پلی‌مرشدن جلوگیری می‌کند. «دو برابر کردن مقدار آن به‌مراتب بهتراست.» در این‌باره شرح دهید.

۸. برای طراحی فرایندهای پلی‌مر شدن باید به گرماگیری توجه کرد. چرا؟

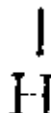
۹. مقدار گرمای به‌دست آمده از پلی‌مر شدن پلی‌اتیلن، پلی‌استر، و کوپلی‌مر ۵۰ـ۵۰ از این‌دو، را باهم مقایسه کنید.

۱۰. رابطهٔ ۷ــ۲ــ۸ را مجدداً طوری بنویسید که به‌جای $H_2O$، $NH_3$ محصول فرعی باشد. توضیح دهید که چرا معمولا $H_2O$ محصول فرعی است و $NH_3$ نیست.

۱۱. ترکیب چند لاستیك را، بجز آنهایی که در جدول ۷ــ۲ــ۲ آمده است، بنویسید.




۱۲. به‌وسیلهٔ شکل نشان دهید که چرا بخش —C— وینیل کلرید گروهی قطبی است.



۱۳. چرا فلزات به‌ندرت شیشه‌ای‌اند ولی پلی‌مرهای بی‌شکل معمولا شیشه‌ای‌اند؟

۱۴. مولکولهای پلی‌اتیلن «دندان اره‌ای»است، ولی در بلور خود به‌صورت مستقیم‌است (شکل ۷ــ۳ــ۴). وقتی این ماده در سیکلوهگزان (حلال مایع) حل می‌شود، صورتبندی گره‌خوردهٔ شکل ۷ــ۱ــ۷ را دارد. هردوصورت پایداراست چرا؟

۱۵. شرح دهید که چرا ضریب انبساط گرمایی [شیب منحنی شکل۷ــ۵ــ۴(ب)]،دربالای $T_g$ بیشتر است از پایینتر از $T_g$.

۱۶. مقدار دقیق $T_g$ به‌سرعت سردشدن بستگی دارد. چرا؟

۱۷. چرا پلی‌وینیل‌کلرید به‌ندرت بلوری می‌شود؟

۱۸. کوپلی‌مری از دووینیل ممکن است تصادفی یا به‌صورت تجمعی ازگروهی مر باشد. که درطول زنجیر به‌صورت خوشه‌ای قرارگرفته‌اند (مثلا – BBAAAAAABB BBBBBBBA-BAAAAA). گروه اخیر آسانتر ازکوپلی مر تصادفی (BAABABBBABAABAAABABBABAB-) بلوری‌می‌شود. علت‌آن‌را شرح دهید.

۱۹. دمای شیشه‌ای‌کوپلی‌مر کمتر ازدمای شیشه‌ای متوسط دوپلی مر تشکیل‌دهندهٔ آن‌است. علت آن‌را شرح دهید.

۲۰. اگر فنل وفرم‌آلدئیدپلی‌مرشوند محصول‌فرعی‌چه‌خواهدبود؟ اگر اوره و فرم‌آلدئید پلی‌مر شوند (شکل ۲ــ۳ــ۱) چطور؟

۲۱. قراضه‌های مواد گرمانرم برای بازگردانی مناسبترند یا مواد گرما سخت؟ چرا؟

۲۲. پیشنهاد شده است که از بوتادین (شکل ۷ــ۲ــ۲) برای اتصال متقاطع پلی‌اتیلن استفاده شود. مزایا و معایب آن‌را شرح دهید.

۲۳. شرح دهید که چرا لاستیك در دمایی که در آن نیتروژن مایع وجود دارد (۷۷K) شکننده است.

۲۴. یك‌بار دیگر با خمیر مجسمه‌سازی که در بچگی داشتید بازی‌کنید. رفتار آن‌را شرح دهید.

۲۵. منحنیهای شکل ۷ــ۵ــ۵(ب) را برای کسی که این درس را نگرفته است شرح دهید.

۲۶. روابط بین مدول ویسکوالاستیك، دمای شیشه‌ای وثابت دی الکتریك را شرح دهید.

## مسائل

۷ـ۱ـ۱ پلی‌مری معمولی، مر $C_2H_2Cl$ را دارد. (شبیه به پلی‌وینیل کلرید (شکل ۷ـ۱ـ۳) است بجز آنکه هرمر، کلر ثانویه‌ای (ویك هیدروژن کمتر) دارد.) هر مولکول دارای میانگین جرمی ۶۰۰۰۰amu است. الف) جرم مر آن چقدر است؟ ب) درجهٔ پلی‌مرشدن آن چقدر است؟

جواب: الف) ۹۷ amu (یامول/g ۹۷) ب) ۶۲۰

۷ـ۱ـ۲ درهر گرم پلی‌وینیل کلرید $10^{20}$ مولکول وجود دارد. الف) میانگین اندازهٔ مولکولی چقدر است؟ ب) درجهٔ پلی‌مر شدن چقدر است؟

۷ـ۱ـ۳ نقطهٔ ذوب، $T_m$، پارافینها ($C_xH_{2x+2}$)، برحسب K، در شکل۷ـ۱ـ۱ گاهی از رابطهٔ تجربی زیر به‌دست می‌آید

$$T_m = [0{,}0024 + 0{,}017/x]^{-1} \qquad (۷\text{ـمسائل}ـ۱)$$

نقطهٔ ذوب پلی‌اتیلن در سه‌حالت زیر چقدر است؟ الف) وقتی درجهٔ پلی‌مر شدن $n$، برابر ۱۰ باشد؟ ب) درجهٔ پلی‌مر شدن برابر ۱۰۰ باشد؟ ج) درجهٔ پلی‌مر شدن برابر ۱۰۰۰ باشد؟ (لازم به‌ذکر است که مر = $C_2H_4$).

جواب:الف) ۳۵°C ب) ۱۳۰°C ج) ۱۴۲°C

۷ـ۱ـ۴ دو گرم دکستروز($C_6H_{12}O_6$) در۱۴ گرم آب حل می‌شود. نسبت هرنوع مولکول چقدر است؟

۷ـ۱ـ۵ الف) «میانگین جرمی» اندازهٔ مولکولی، در مولکولهای مثال ۷ـ۱ـ۲ چقدر است؟ ب) «میانگین عددی» اندازهٔ مولکولی چقدر است؟

جواب: الف) ۳۱٫۷amu ب) ۲۱٫۶ amu

۷ـ۱ـ۶ برای تعیین میانگین اندازهٔ مولکولی پلی‌مری، داده‌های زیر به‌دست آمده‌است

| اندازهٔ مولکولی متوسط در یك فاصله | جرم |
|---|---|
| ۳۰۰۰۰ amu | ۳٫۰ g |
| ۲۰۰۰۰ | ۵٫۰ |
| ۱۰۰۰۰ | ۲٫۵ |

«میانگین جرمی» اندازهٔ مولکولی را حساب کنید.

**۷-۱-۷** الف) نسبت مولکولها درهر سه دسته اندازهٔ مسئلهٔ ۷-۱-۶ چقدر است؟ ب) «میانگین عددی» اندازهٔ مولکولی چقدر است ؟

جواب: الف) ۰٫۲۱۷, ۰٫۴۱۷, ۰٫۱۶۷ ب) ۱۷۵۰۰ amu

**۷-۱-۸** پلی‌اتیلن حاوی تعداد مساوی مولکول با ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۴۰۰، و۵۰۰ مر است. میانگین جرمی اندازهٔ مولکولی چقدر است؟

**۷-۱-۹** پلی‌وینیل‌کلرید $\text{+}C_2H_3Cl\text{+}_n$ در حلال آلی حل می‌شود. الف) میانگین‌مربعات طول‌مولکولی با جرم مولکولی ۲۸۵۰۰ g/mole، چقدر است؟ ب) با یک‌دوم‌میانگین مربعات طول قسمت (الف)، جرم مولکولی چقدر خواهد بود؟

جواب: الف) ۲٫۶۵ nm ب) ۷۱۲۵ g/mole

**۷-۱-۱۰** درجهٔ‌پلی‌مرشدن ومیانگین مربعات طول مولکول میانگین در مسئلهٔ ۷-۱-۸را درصورتی‌که پلی‌مرپلی‌وینیل الکل باشد تعیین‌کنید (میانگین عددی).

**۷-۱-۱۱** ماده‌ای پلی‌مری حاوی مولکولهای پلی‌وینیل‌کلریداست ودر هرمولکول به‌طور متوسط ۹۰۰مر دارد. اگرهریک از مولکولها بتوانند بدون‌گره شوند و به‌صورت‌مولکول راست‌درآیند (بجز درمورد زاویه‌های‌پیوند ۱۰۹٫۵°) بیشینهٔ‌کرنشی‌که‌این‌پلی‌مرمی‌تواند داشته باشد چقدر است؟

جواب: ۳۳۰۰٪ کرنش

**۷-۲-۱** درصورتی‌که ۷گرم اتیلن پلی‌مر شده وبه‌صورت پلی‌اتیلن درآید، با استفاده از داده‌های فصل۲، تغییر انرژی خالص آن چقدر است؟

جواب: ۱۵۰۰۰J −

**۷-۲-۲** الف) هنگام پلی‌مرشدن بوتادین چه تعداد پیوند C=C درهر مر از بین‌می‌رود؟ ب) چه تعداد پیوند C−C اضافی تشکیل می‌شود؟

**۷-۲-۳** بامراجعه به‌مسئلهٔ ۷-۲-۲، تعیین‌کنید‌که با پلی‌مرشدن ۷ گرم بوتادین چقدر انرژی آزاد می‌شود؟

جواب: ۷۸۰۰J −

**۷-۲-۴** کوپلی‌مری حاوی جرمهای مساوی ازاستیرن وبوتادین است. نسبت مر هرکدام چقدر است؟

**۷-۲-۵** کوپلی‌مر سه‌تایی، ABC، دارای کسر مساوی ازهریک از مرهاست. نسبت مر هریک چقدر است؟

جواب: اکریلونیتریل، ۴ر۰؛ بوتادین، ۴ر۰؛ استیرن، ۲ر۰

**۷-۲-۶** اگر هفت گرم از کوپلی‌مر ABC مسئلهٔ ۷-۲-۵ پلی‌مر شود، چه مقدار انرژی آزاد می‌شود؟

۷-۲-۷ بامراجعه‌به‌مثال ۷-۲-۳، تعیین کنید به‌ازای هر گرم محصول چه‌مقدار آب به‌دست می‌آید.

جواب: ۱۶ر۰ g

**۷-۲-۸** با مراجعه به‌مثال ۷-۲-۳، فرض کنید محصول فرعی واکنش (به‌جای $H_2O$) $NH_3$ باشد. الف) نشان دهید که‌کدام پیوندها باید شکسته شود؟ ب) مقدار تغییرانرژی به‌ازای تشکیل هرمول $NH_3$ چقدر است؟ ج) چرا انتظار وقوع این‌واکنش نمی‌رود؟

**۷-۲-۹** به ۲۸۰ kg اتیلن، قبل‌از پلی‌مر شدن $H_2O_2$ افزوده شده است. میانگین درجهٔ پلی‌مر شدن ۱۰۰۰ به‌دست آمده‌است. فرض کنید تمام $H_2O_2$ برای تشکیل گروه انتهایی مولکولهای پلی‌مر به‌کاررفته باشد. چندگرم $H_2O_2$ اضافه شده است؟ (مر = $C_2H_4$).

جواب: ۳۴۰ g

**۷-۲-۱۰** دو دهم ازیك‌درصد وزنی $H_2O_2$ قبل‌از پلی‌مر شدن به‌اتیلن اضافه شده است. درصورتی که تمام $H_2O_2$ به‌عنوان پایانه‌برای مولکولها به‌کار رود میانگین‌درجهٔ پلی‌مر شدن چقدر خواهد بود؟ (مر = $C_2H_4$)

**۷-۲-۱۱** نسبت مرهای اتیلن ($C_2H_4$) به‌مرهای وینیل‌کلرید ($C_2H_3Cl$) در کوپلی‌مری که از این‌دو تشکیل شده، درصورتی‌که درصد وزنی کلر ۳۰ باشد، چقدراست؟

جواب: ۲ به ۱

**۷-۲-۱۲** نسبت مرهای استیرن به‌بوتادین ۱/۳ است. درصد وزنی کربن چقدر است؟

۷-۳-۱ چگالی متان جامد ۵۴ر۰ $g/cm^3$(۵۴ر۰ $Mg/m^3$ =) است. الف) ثابت شبکهٔ بلور آن که fcc است (شکل ۷-۳-۲) چقدر است؟ ب) «شعاع» مولکول $CH_4$ چقدر است؟

جواب: الف) ۵۸۲ر۰ nm ب) ۲۰۶ر۰ nm

**۷-۳-۲** ید بلوری دارای چگالی ۹۳ر۴ $Mg/m^3$(۹۳ر۴ $g/cm^3$ =) و ساختاری مطابق شکل ۷-۳-۳ است، بعدسوم سلول واحد چقدر است؟

**۷-۳-۳** یك پلی‌اتیلن بدون آنکه بلورینگی داشته باشد، دارای چگالی ۹۰ر۰ $Mg/m^3$ است. چگالی اتیلن تجارتی کم چگالی (LDPE) ۹۲ر۰ $Mg/m^3$ است، در حالی که

چگالی HDPF، $Mg/m^3$ ۰٫۹۶ است، کسر حجمی بلورینگی را در هریك از حالات تخمین بزنید.

جواب: $C_{LDPE}=$ ۰٫۱۸؛ $C_{HDPE}=$ ۰٫۵۵

**۷-۳-۴** بااستفاده ازمثال ۷-۳-۱ و مسئلهٔ ۷-۳-۳، مقدار «فضای آزاد» را در LDPE؛ و در HDPE حساب کنید.

**۷-۳-۵** سه تصویر مستطیلی اتمها درسلول واحد پلی‌اتیلن (شکل ۷-۳-۴) را رسم کنید.

**۷-۴-۱** درصورتی‌که از گوگرد به‌عنوان اتصال متقاطع در نقاطی‌که امکانپذیر باشد استفاده شود در الف) پلی‌ایزوپرن و ب) پلی‌کلروپرن، درصد گوگرد چقدر است؟

جواب: الف) ۳۲٪ گوگرد ب) ۲۶٫۵٪ گوگرد

**۷-۴-۲** لاستیکی حاوی ۹۱٪ کلروپرن پلی‌مری شده و ۹٪ گوگرد است چه‌کسری از اتصالات متقاطع‌ممکن توسط وولکانش متصل شده‌اند؟ (فرض‌کنید که تمام گوگرد برای اتصالات متقاطع، از نوعی که در شکل ۷-۴-۴ دیده می‌شود، استفاده شود.)

**۷-۴-۳** لاستیکی حاوی ۵۴٪ بوتادین، ۳۴٪ ایزوپرن، ۹٪ گوگرد، و ۳٪ کربن سیاه است. به‌فرض آنکه تمام گوگرد در اتصالات متقاطع به‌کار رود، چه‌کسری از اتصالات متقاطع توسط وولکانش متصل می‌شوند؟

جواب: ۰٫۱۸۸

**۷-۴-۴** لاستیك A (۲۰۰ g) حاوی ۱۶۸ g بوتادین $(C_4H_6)_n$ و ۳۲ g گوگرد است. الف) درصورتی‌که تمام گوگرد در این اتصالات به‌کار رود، از چه‌کسری از اتصالات متقاطع استفاده شده است؟

لاستیك B (۲۱۷ g) حاوی ۱۶۸ g ایزوپرن $(C_5H_8)_n$ و ۴۹ g سلنیم است. اگرچه استفاده از سلنیم مضرات بسیاری‌دارد، ولی می‌تواند در لاستیك اتصال متقاطع به‌وجود آورد. (این عنصر در جدول تناوبی درست زیر گوگرد قرار دارد.) ب) کدامیك از لاستیکهای A و B اتصال متقاطع بیشتری خواهند یافت؟

**۷-۴-۵** اگر فنل با فرم‌آلدئید به‌صورت سه‌تابعی پلی‌مری شده و تمام محصول فرعی، آب، تبخیر شود، درصد کاهش وزن چقدر خواهد بود؟

جواب: ۱۹٪

**۷-۴-۶** شرکت X رزینی از فنل و فرم‌آلدئید را خریداری کرده‌است، که به‌طور جزئی پلی‌مری شده است. نمونه‌ای از آن (۱۰٫۳ g) در قالب گرمی پرس‌شد. این رزین در ابتدا گرمانرم بود، ولی پس‌از چند دقیقه سخت شد. پس از آنکه نمونه کاملا خشك شد،

وزن آن به ۶٫۹ گرم رسید. اگر فرض کنیم که محصول نهایی ۳ پل $-CH_2-$ دارد، تعداد اتصالات $-CH_2-$ را که فنل در ابتدا داشته است معلوم کنید؟

**۷-۴-۷** یک کیلو گرم دی‌وینیل‌بنزن (شکل ۷-۲-۳) به ۵۰ کیلوگرم استیرن افزوده شده است. بیشینهٔ تعداد اتصالات متقاطع در هر گرم محصول چقدر است؟

جواب: $9 \times 10^{19}/g$

**۷-۴-۸** چه‌مقدار گوگرد باید به ۱۰۰ g لاستیک کلروپرن افزوده شود تا ۱۰٪ از مرهای آن اتصال متقاطع یابد؟ (فرض کنید تمام گوگرد موجود همان‌طور که درشکل (۷-۲-۴) درمورد بوتادین نشان دادیم مورد استفاده قرار گرفته باشد.)

**۷-۵-۱** تنش در مدت ۱۲۳ روز از ۷٫۰ MPa به ۵٫۰ MPa افت کرده است. الف) زمان افت چقدر است؟ ب) چه‌مدت طول می‌کشد تا به ۳٫۰ MPa افت کند؟

جواب: الف) ۳۶۶ روز ب) ۱۸۷ روز بیشتر (مجموعاً ۳۱۰ روز)

□ **۷-۵-۲** برای ایجاد ۵۰٪ کرنش در یک قطعه لاستیک، تنش اولیهٔ ۱۰٫۴ MPa لازم است. پس‌از آنکه کرنش برای‌مدت ۴۰ روز ثابت باقی‌ماند. تنش لازم فقط ۲٫۵ MPa خواهد بود. تنش لازم برای نگه‌داشتن این کرنش پس‌از ۸۰روز چقدر خواهد بود. مسئله را بدون ماشین‌حساب حل کنید.

□ **۷-۵-۳** زمان افت پلی‌مری ۴۵ روز و مدول کشسانی آن ۷۰ MPa است (هر دو در ۱۰۰ °C). پلی‌مر به‌اندازهٔ ۵٪ فشرده شده و در ۱۰۰ °C نگه‌داشته شده است. تنش در الف) ابتدا و ب) پس‌از ۱ روز و ج) پس‌از ۱ ماه و د) پس‌از ۱ سال چقدر است؟

جواب: الف) ۳٫۵ MPa ب) ۳٫۴ MPa ج) ۱٫۸ MPa د) ۱۰۰۰ Pa

□ **۷-۵-۴** اگر دما از ۲۰ °C به ۳۰ °C افزایش یابد، زمان افت نخ نایلون از ۴۰۰۰ دقیقه به ۳۰۰۰ دقیقه کاهش می‌یابد. الف) انرژی فعالسازی افت را معین کنید؛ ب) در چه دمایی زمان افت ۲۰۰۰ دقیقه است.

**۷-۵-۵** لوسیت (PMM درشکل ۷-۵-۴) به‌مدت یک‌ساعت در دمای ۱۲۵ °C تحت بار قرارگرفته است. الف) برای آنکه کرنشی معادل آن درمدت ۳۶ ثانیه به‌دست آید، بار چقدر باید افزایش‌یابد، ب) مسئله را برای ۱۰۰ °C تکرار کنید.

جواب: الف) $s_{0.01}/s_1 = 2.5$ ب) $14(s_1)$

□ **۷-۶-۱** ثابت دی‌الکتریک نسبی $\kappa$ برای لاستیک ایزوپرن در ۰ °C، ۳٫۰ است. اختلاف ولتاژ (dc) لازم برای‌آنکه‌چگالی بار در پوشش فلزیی که لایهٔ ۱٫۰ میلی‌متری را پوشانده است، برابر $10^{-5}C/m^2$ شود چقدر است؟

جواب: V ۳۷ر۷

□ ۷-۶-۲ قطبش لاستیک درمسئلهٔ ۷-۶-۱، درهر $mm^2$ چند الکترون را در پوشش فلزی شرکت داده است؟

۷-۶-۳ الف) در صورتی که V ۱۰۰ به‌خازن اعمال‌شود قطبش در پلی‌وینیل کلرید مثال ۷-۶-۲ در Hz ۱۰۰ چقدراست؟ ب) چگالی الکترون درصفحهٔ خازن چقدر خواهدبود؟

جواب: الف) $C/m^2$ ۰٫۰۰۰۲ ب) $/m^2$ الکترون $10^{15}$ × ۱٫۴

۷-۶-۴ صفحهٔ خازنی باید ظرفیتی معادل $\mu f$ ۰٫۲۵ داشته باشد. اگر لایهٔ (۰٫۰۱۳ mm) مایلار که به‌عنوان مادهٔ بین صفحات خازن استفاده می‌شود دارای ثابت دی‌الکتریک ۳٫۰ باشد مساحت آن چقدر باید باشد؟

۷-۷-۱ وزن پلی‌ایزوپرن خام (یعنی لاستیک طبیعی وولکانش نشده) پس از یافتن اتصال متقاطع با اکسیژن هوا ۲٫۳ درصد افزایش می‌یابد. چه کسری از اتصالات متقاطع ممکن به‌وجود آمده است؟

جواب: ۰٫۱۰

۷-۷-۲ وزن لاستیک کلروپرن به‌وسیلهٔ اکسایش ۳درصد افزایش می‌یابد. فرض کنید که اکسیژن اتصال متقاطع به‌وجودآورد. چه کسری از نقاط لنگر مانند (اتصال متقاطع یافته) حاوی اتم اکسیژن است؟

۷-۷-۳ لاستیکی حاوی ۴۷درصدوزنی ایزوپرن، ۳۸ درصد وزنی بوتادین، و ۱۵درصد وزنی مادهٔ خنثی درمعرض گاز ازن قرار می‌گیرد و به‌ازای هر ۱۰۰ گرم محصول اولیه g ۶٫۰ به‌وزن آن افزوده می‌شود. فرض کنید که افزایش وزن در نتیجهٔ اتصال متقاطع به‌دست آید. چه کسری از اتصالات متقاطع ممکن کامل شده است؟

جواب: ۲٫۷%

۷-۷-۴ الف) برای آنکه انرژی لازم برای شکستن پیوند C — H میانگین در پلی‌اتیلن تأمین شود، فوتون چه بسامد و طول‌موجی باید داشته باشد؟ ب) چرا بعضی از پیوندها می‌توانند با امواج اندکی بلندتر الکترومغناطیسی شکسته شوند؟

۷-۷-۵ میانگین انرژی پیوند C — Cl طبق جدول ۲-۳-۱، ۳۴۰ kJ/mole (۸۱ kcal/mole) است. آیا نورمرئی [۴۰۰ nm (بنفش) تا ۷۰۰ nm (قرمز)] انرژی کافی برای شکستن پیوند میانگین C — Cl را دارد؟

جواب: ۳۵۰ nm لازم است.

۷-۷-۶ براساس داده‌های جدول ۲-۳-۱، انرژی‌خالص لازم برای آنکه شکل ۷-۷-۳

(الف) به‌شکل ۷–۷–۳ (ج) تبدیل شود، چقدر است؟

**۷–۷–۷** الف) میانگین و ب) میانهٔ چگالیهای زیر برای پلی‌اتیلن چقدر است؟

۰٫۹۲۶    ۰٫۹۲۱    ۰٫۹۲۳    ۰٫۹۲۴    ۰٫۹۳۰    ۰٫۹۲۶

۰٫۹۲۸ $Mg/m^{۳}$(= ۰٫۹۲۸$g/cm^{۲}$)    ۰٫۹۲۲    ۰٫۹۲۹    ۰٫۹۲۷

□ ج) انحراف معیار چقدر است؟

جواب: الف) ۰٫۹۲۵۶ $Mg/m^{۳}$ ب) ۰٫۹۲۶ $Mg/m^{۳}$ (= ۰٫۹۲۶$g/cm^{۳}$)
ج) ۰٫۰۰۳۰ $Mg/m^{۳}$

**۷–۷–۸** الف) میانگین، ب) میانه و □ ج) انحراف معیارمجموعهٔ استحکامهای زیر را برای پلی‌استیرن معین کنید:

۱۲٫۱    ۱۱٫۵    ۱۲٫۰    ۱۲٫۱    ۱۱٫۷    ۱۲٫۲    ۱۲٫۸    MPa    ۱۱٫۸

۱۲٫۰    ۱۲٫۴    ۱۱٫۶    ۱۱٫۹    ۱۲٫۲    ۱۲٫۷    ۱۲٫۳

۱۲٫۲    ۱۲٫۳    ۱۳٫۰    ۱۱٫۷    ۱۲٫۳    ۱۲٫۹    ۱۲٫۱

۱۱٫۹    ۱۲٫۱    ۱۲٫۷    ۱۲٫۷    ۱۱٫۸    ۱۳٫۱    ۱۲٫۲

۱۲٫۴    ۱۲٫۱    ۱۱٫۵    ۱۱٫۹    ۱۱٫۴    ۱۲٫۴    ۱۲٫۵

۱۲٫۲    ۱۲٫۳    ۱۱٫۰    ۱۲٫۵    ۱۲٫۲    ۱۲٫۵    ۱۲٫۹



# مواد سرامیکی

## چشم‌انداز فصل

مواد سرامیکی حاوی فازهای مرکب از عناصر فلزی و غیرفلزی‌اند. بسیاری از این موادرا می‌توان نـام برد $Al_2O_3$ ، شیشه‌هـای غیرآلی، محصولات رسی، و پیزوالکتریکهای پیچیده مثل $Pb(Zr,Ti)O_3$ همه در زمرهٔ این موادند.

به‌طور کلی، می‌توان گفت که ترکیبات سرامیکی درمقابل گرما ومحیطهای شیمیایی مقاومتر از اجـزای تشکیل‌دهندهٔ آنـهایند؛ مثلا $Al_2O_3$ به‌عنوان یـك ترکیب در مقایسه باهریك ازعناصر اکسیژن وآلومینیم مقاومتر است. ازآنجا که ترکیبها در مقایسه با اجزای مربوط به‌آنها ذاتاً کوئوردیناسیون انمی پیچیده‌تری دارنـد، درمی‌یابیم کـه در مقابل لغزش مقاومت بیشتری دارنـد، به طوری کـه سرامیکها معمولا سخت‌تر و همیشه‌شکننده‌تر از اجزای فلزی یا پلی‌مری خودند. ویژگیهای دی‌الکتریکی، نیمرسانایی، ومغناطیسی سرامیکهای مهم‌برای مهندسان و دانشورزان طراح یـا استفاده‌کننده از ابزار و مدارهـای الکترونیکی، به‌طور خاصی ارزشمند است.

## هدف از مطالعه

۰۱ نشان دادن آرایشهای اتمی در ساختارهای فشردهٔ $AX$ که در آنها $CN = 8$، $CN = 6$، و $CN = 4$ است.

۰۲ محاسبهٔ چگالی ترکیبهای $AX$ به‌منظور درك ساختارهای آنها.

۰۳ استفاده از ساختارهای قبلی به‌عنوان اساس درك چند ساختار دیگری که در کاربردهای مهندسی بیشتر به آنها برمی‌خوریم ($CaF_2$، $Al_2O_3$، $BaTiO_3$، و فریتها).

۰۴ درك منبع پیزوالکتریسیته‌در بلورهای سرامیکی، و توانایی محاسبه قطبش.

□ ۰۵ درك منبع فری مغناطیسی در بلورهای سرامیکی، و توانایی محاسبهٔ مغناطیسی شدن.

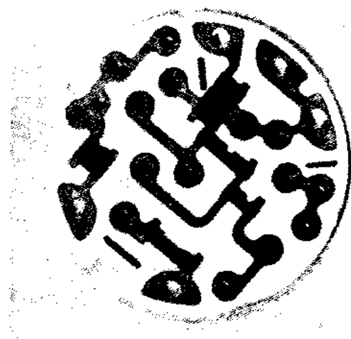
۰۶ تشخیص اینکه (الف) چرا موادسرامیکی (مانند ترکیبات سه‌بعدی دیگر) تحت فشار پراستحکام، تحت کشش ضعیف، و تردند، و (ب) برای کارایی بهینه، باید این مواد را تحت تنشهای فشاری به‌کار برد.

۰۷ مربوط کردن حرکت اتمها و جابه‌جایی آنها به‌فرایندهای شکل‌دادن ویسکوز، تفجوشی، و بازپخت.

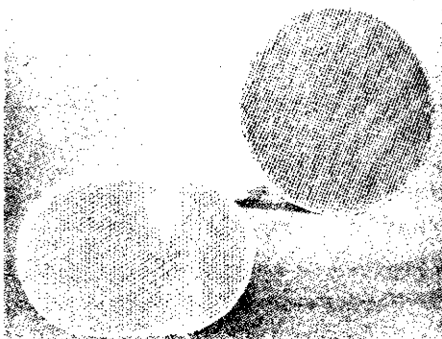
## ۸-۱ فازهای سرامیکی

واژهٔ سرامیك بیشتر به‌عنوان صفت توصیف کنندهٔظروف هنری شناخته شده است، حال آنکه برای‌مهندس بسیاری ازمواد مانند شیشه، آجر، سنگ، بتن، ساباها، لعابهای‌چینی، عایقهای الکتریك، مواد مغناطیسی غیرفلزی، مواد نسوز، و بسیاری دیگر (شکل ۸-۱-۱) سرامیك محسوب می‌شوند. ویژگی مشترك تمام این مواد آن است کسه ترکیباتی از فلزات و غیرفلزات‌اند. این ترکیبات توسط پیوندهای یونی یا کووالانسی به‌هم متصل می‌شوند. بنابراین خواص آنها بافلزات فرق دارد. سرامیکها معمولا عایق، شفاف (یا نیمه‌شفاف)، نوعاً غیرقابل‌تغییرشکل، و در محیطهای به‌شدت‌خورنده به‌طور غیرقابل انتظاری پایدارند (شکل ۸-۱-۱).

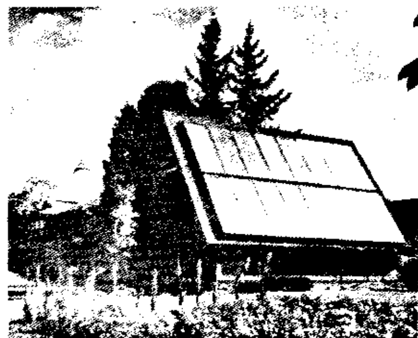
ترکیب $MgO$ نشاندهندهٔ مادهٔ سرامیکی ساده‌ای بانسبت یك به‌یك از اتمهای فلز و غیر فلز است. این ترکیب بیشتر به‌عنوان نسوز به‌کار می‌رود زیرا می‌تواند به‌نحو فوق‌العاده‌ای در دمای بالا ($1500^\circ C - 2500^\circ C$، یا $3000^\circ F - 4500^\circ F$) بدون تجزیه یا ذوب‌شدن به‌کار رود. رس نیز مادهٔ سرامیکی معمولی است ولی بسیار پیچیده‌تر از $MgO$ است. ساده‌ترین رس $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ است. ساختار بلوری آن دارای چهار واحدمختلف $Al$، $Si$، $O$ و رادیکال ($OH$) است. اگرچه‌مواد سرامیکی به‌سادگی



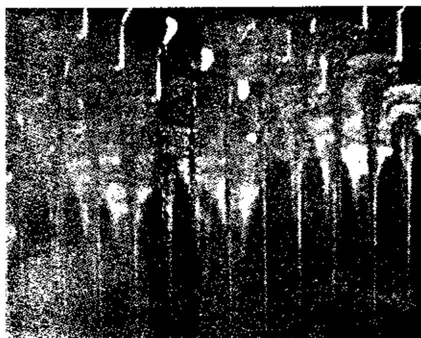
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

**شکل ۸-۱-۱** نمونه‌هایی ازمحصولات سرامیکی فنی. الف) مدارهــای چاپی. قسمت اصلی آن $Al_2O_3$ است زیرا پیوند یونی قــوی آن مانع از انتقال الکتریکی می‌شود. اجزای چاپ‌شدهٔ آن گرد اکسیدهای نیمرسانا وفلزاتی است که جریان مداررا تأمین می‌کنند؛ ب) نگهدارنده‌های کاتالیزوری. این قطعات سرامیکی لانـهٔ زنبوری شکل در سیستمهای اگزوز اتومبیل قــرار می‌گیرند و نگهدارندهٔ کاتالیزورهایی‌اند که هیدروکربنهای نسوخته را از طریق اکسایش از بین مــی‌برند. در اینجا باردیگر از $Al_2O_3$ استفاده می‌شود زیرا در دماهای بالا و در حین کار در شرایط ارتعاشی، بسیار پراستحکام و مقاوم است؛ ج) باتریهــای خورشیدی. شیشه جزء مهمی در گرم‌کننده‌های خورشیدی است زیرا صفحهٔ آن نسبت به انرژی تشعشعی، شفاف است. زمانی که تشعشع به‌گرما تبدیل می‌شود انرژی باید ذخیره شود و باقی بماند. البته عمر زیــاد و تعمیرات قابل‌اغماض اهمیت دارد؛ د) رشته‌های شیشه‌ای. این‌رشته‌های شیشه‌ای درآزمایشگاه باعبور از شیپوره‌های پلاتینی به‌صورت الیاف پیوسته‌ای درآمده‌اند. ابعاد رشته‌ها با تغییردمای شیپوره‌ها و سرعتی که درآن شیشه ازشیپورهٔ داغ عبور می‌کند کنترل می‌شود. تولید تجارتی الیاف درصدها شیپوره و با سرعت چندکیلومتر در دقیقه انجام می‌شود که درنتیجهٔ آن الیافی به‌قطر چند میکرومتر به‌وجود می‌آید.

فلزات نیستند، آنهارا نیز می‌توان برحسب ساختار داخلیشان رده‌بندی و مشخص کرد. علاوه براین از ساختار فلزات ساده می‌توان به‌عنوان نقطهٔ شروع استفاده‌کرد.

**مقایسهٔ فازهای سرامیکی و غیر سرامیکی.** بیشتر فازهای سرامیکی مانند فلزات ساختار بلوری دارند، ولی برخلاف فلزات در این ساختارها تعداد الکترونهای آزاد زیادنیست. این الکترونهایا به‌طریق کووالانسی با اتمهای مجاور به‌اشتراک گذاشته می‌شوند، یااز یک‌اتم به‌اتم دیگر منتقل شده پیوند یونی به‌وجود می‌آورندکه دراین‌صورت اتمها یونیده شده و بار حمل می‌کنند.

پیوندهای یونی، مواد سرامیکی را نسبتاً پایدار می‌کنند. در مجموع سرامیکها نسبت به‌فلزات یا مواد آلی نقطهٔ ذوب بسیار بالاتری دارند. به‌طورکلی سخت‌تر و در مقابل تغییرات شیمیایی بادوام‌ترند،کانیهای سرامیکی جامد ـ مانند مواد آلی ـ عایق‌اند. در دماهای بالا که انرژی گرمایی زیاد است، سرامیکها الکتریسیته را هدایت می‌کنند ولی مقدار آن در مقایسه با فلزات بسیارکم است. بیشتر سرامیکها به‌دلیل نداشتن‌الکترون آزاد، حداقل وقتی به‌صورت ورقه‌های نازک هستند، شفاف‌اند ورسانای گرمایی بسیار ضعیفی هستند.

در بسیاری از مواد سرامیکی ویژگیهای بلوری دیده می‌شود. مثلا «میکا» صفحات رخ‌برگی دارد که در امتداد آنها به‌آسانی شکاف برمی‌دارد. همچنین در بلورهای ساده‌تر از قبیل «MgO»، مانند فلزات، لغزش پلاستیکی رخ می‌دهد. شکل بلوری آن ممکن است در حین رشد بلور به‌وجود آید؛ همچنان‌که از طرح مکعبی نمك طعام مشخص است. در پنبهٔ نسوز بلورها تمایل زیادی به‌خطی‌شدن دارند؛ در میکا و خاك‌رس بلورها ساختار ورق مانند و دوبعدی‌تشکیل می‌دهند. درمواد سرامیکی محکمتر وبادوامترساختاری مشبك وجود داردکه دارای پیوندهایی قوی و مساوی در سه‌جهت‌اند.

ساختار بلوری مواد سرامیکی در مقایسه با فلزات نسبتاً پیچیده است.این‌پیچیدگی ساختاری همراه با محکمتربودن پیوندهای بین اتمی موجب می‌شودکه واکنشها در مواد سرامیکی بسیارکند صورت‌گیرند. مثلا درمورد شیشه، هرگاه سرعت سردکردن عادی‌باشد اتمها برای نوآرایی به‌صورت ساختار بلوری پیچیده فرصت‌کافی نمی‌یابند و در نتیجه تا مدت زیادی در دمای اتاق به‌صورت مایع فوق سرد باقی می‌مانند.

ساختار و خواص مواد مرکب از قبیل‌کاربیدها و نیتریدهای نسوز در حد واسطی بین مواد سرامیکی وفلزی قرار دارد. مثلا اجسام مرکبی چون ZrN،BN،SiC،TiC که شامل عناصر نیمه فلزی‌اند و ساختار آنها ترکیبی از پیوند فلزی وکووالانسی است. نمونهٔ دیگر، اسپینلهای فرومغناطیسی‌است. چنین ترکیباتی به‌دلیل نداشتن الکترون آزاد، رسانای خوب الکتریسیته نیستند ولی اتمها می‌توانند در ساختار بلوری چنان آرایش یابندکه خواص مغناطیسی موجود درآهن و فلزات وابسته به‌آن، در آنها ایجاد شود.

ساختار وخواص ترکیبات سیلیسیم درحد واسط بین مواد آلی و سرامیکی قرار دارد. این ترکیبات غالباً پلی‌مر غیرآلی‌نامیده می‌شوند. بالاخره روابط ساختاری‌نزدیکی

بین پلی‌مرهای بی‌شکل و شیشه‌های تجارتی وجود دارد و این مطلبی است که در فصل ۷ به‌هنگام تعیین دمای شیشه‌ای، $T_g$، مورد بحث قرار گرفت.

## ۸-۲ بلورهای سرامیکی (AX)

ساده‌ترین ترکیبات سرامیکی شامل تعداد مساوی اتمهای فلزی و غیر فلزی است، این ترکیبات ممکن است یونی باشند مانند MgO، که در آنها دو الکترون از اتم فلزی به اتم غیرفلزی انتقال یافته و کاتیون ($Mg^{2+}$) و آنیون ($O^{2-}$) به‌وجود آورده‌است. ترکیبات AX ممکن است کووالانسی باشند در این حالت الکترونهای ظرفیتی تا حدزیادی به اشتراک گذاشته می‌شوند. روی سولفید (ZnS) نمونه‌ای از این نوع ترکیبات است.

ویژگی ترکیبات AX آن است که اتمهای A فقط توسط اتمهای X احاطه شده‌اند ونخستین همسایه‌های اتمهای X، اتمهای A هستند. به‌همین دلیل اتمها (یا یونهای) A و X کاملا منظم‌اند. اگر تعداد اتمهای X و A مساوی وعدد کوئوردیناسیون مطابق با آنچه باشد که گفته شده، سه‌شق عمده برای تشکیل ترکیبات AX وجود دارد که عبارت‌اند از

CsCl با CN = ۸

NaCl با CN = ۶

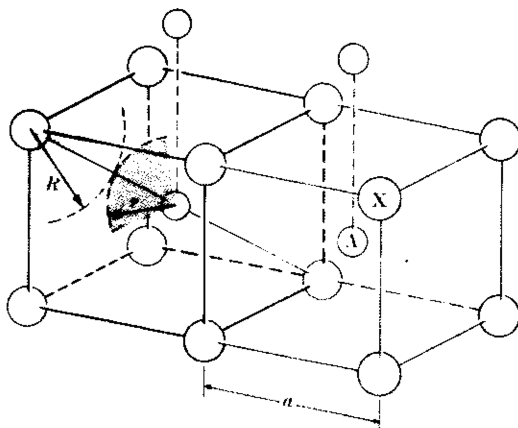
ZnS با CN = ۴

CsCl آرایهٔ مکعبی ساده‌ای دارد. NaCl و ZnS آرایهٔ fcc دارند.

**ساختارهای AX (نوع CsCl)**. در شکل ۸-۲-۱ هر اتم A هشت همسایه از اتمهای X دارد. (وبسط ساختار نشان می‌دهد که هر اتم X هشت همسایه از اتمهای نوع A دارد.) این ساختار bcc نیست زیرا مکانهای ۰،۰،۰ و ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲ یکسان نیستند. بلکه مکعبی ساده است به‌طوری که مکانهای معادل فقط با انتقالهایی برابر مضرب‌صحیح $a$ به‌هم مربوط می‌شوند. در شکل ۸-۲-۱ ازآنجا که مکانهای اشغال‌شده توسط اتمها یا یونهای A در مکانهایی قرار دارند که توسط هشت همسایه احاطه شده است، می‌توان از آنها به‌عنوان مکانهای بین‌نشینی ۸گانه (یا به‌عبارت ساده‌تر مکانهای 8-f) در شبکه مکعبی ساده نام برد.

همین ساختار در بخش ۳-۵ و شکل ۳-۵-۴ به‌عنوان ساختار برنج $\beta'$ مورد بررسی قرار گرفته بود. ولی به‌طورکلی بین سرامیکها معمول نیست. زیرا کاتیونهایی که الکترون از دست می‌دهند، تاحد قابل‌توجهی کوچکتر ازآنیونهایی‌اند که الکترونهای اضافی دارند. بنابراین در تعداد اندکی از ترکیبات یونی نسبت $r/R$ برابر ۰٫۷۳ و یا بیشتر است و این نسبتی است که برای CN = ۸ لازم است (جدول ۲-۶-۱).

ثابت شبکهٔ $a$ در ترکیب نوع CsCl مستقیماً به‌شعاع یونی بستگی دارد، زیرا $(r+R)$ نصف قطر مکعب است.

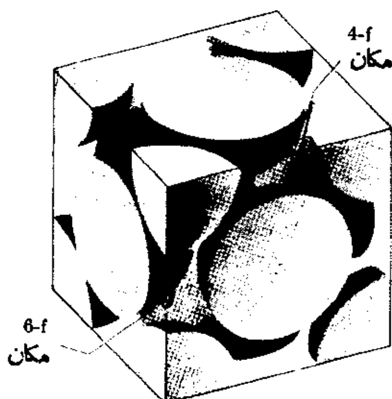



**شکل ۸-۲-۱** ساختار AX (نوع CsCl). اتم یا یون A در مکان بین‌نشینی بین هشت‌اتم X (در مکان f-۸) قرار می‌گیرد. این مکانهای ۱/۲،۱/۲،۱/۲ در تمام سلولهای واحد اشغال شده‌اند. همچنین باید توجه داشت که اتمهای X بین۸ اتمA قرارگرفته‌اند. ثابت‌شبکهٔa برابر $۲(r+R)/\sqrt{۳}$ است.

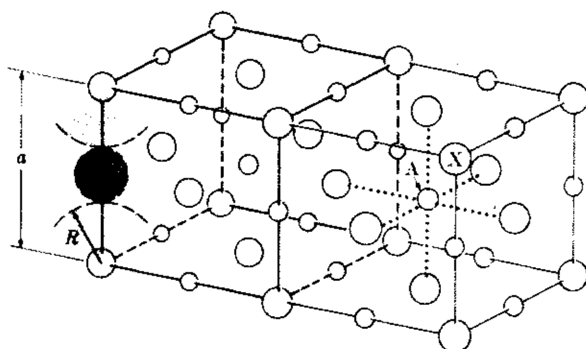
$$(r+R)_{CsCl}=a\sqrt{۳}/۲ \qquad (۸-۲-۱)$$

البته‌ازآنجا که $CN=۸$ است، باید درشعاعهای یونی مندرج در پیوست (ب) تصحیحاتی انجام داد. یادآوری می‌شود که $R_{CN-۸}\approx(R_{CN-۶})/۰٫۹۷$ .

**ساختار AX (نوع NaCl)**.ساختار نوع NaCl دارای شبکهٔfcc ازآنیونهایی‌است که در آن یونهای مثبت در مکانهای بین‌نشینی ۶گانه (مکانهای f - ۶) قرار دارند. چنین مکانی در شکل ۸-۲-۲ شرح داده شده‌است. ساختار NaCl در شکل ۳-۱-۱ دیده




**شکل ۸-۲-۲** مکانهای بین‌نشینی درشبکهٔ fcc. مکانهای f-۶ بین شش‌اتم همسایه قرار دارند. در هر سلول واحد چهار مکان از این نوع وجود دارد. مکان f-۴ بین چهار اتم همسایه‌قرار دارد. درهرسلول واحدهشت‌مکان از این نوع وجود دارد.




**شکل ۸-۲-۳** ساختار AX (نوع NaCl). این شکل را با شکلهای ۳-۱-۱ و ۸-۲-۲ مقایسه کنید. هر اتم A بین شش اتم X قرار دارد (و هر اتم X بین شش اتم A قرار دارد). در هرسلول واحد چهار مکان بین‌نشینی f-۶ موجود است. همهٔ این‌مکانها پرشده‌اند. ثابت‌شبکهٔ $a$ برابر است با $(2r+2R)$.

می‌شود. ترکیب این دوشکل درشکل ۸-۲-۳ نیز کشیده شده است. مکانهای fcc معمولا درنقاط زیر قرار دارند

$$0,0,0 \qquad \frac{1}{2},\frac{1}{2},0 \qquad \frac{1}{2},0,\frac{1}{2} \qquad 0,\frac{1}{2},\frac{1}{2} \tag{۸-۲-۲}$$

ومکانهای f-۶ عبارت‌اند از

$$\frac{1}{2},0,0 \qquad 0,\frac{1}{2},0 \qquad 0,0,\frac{1}{2} \qquad \frac{1}{2},\frac{1}{2},\frac{1}{2} \tag{۸-۲-۳}$$

تعداد هردو مساوی است؛ بنابراین مکانهای f-۶ در ترکیبات AX اشغال شده‌اند. در اینجا نیز مانند ساختارنوع CsCl، فرقی‌نمی‌کند که تمام‌یونهای A درمکانهای fcc قرار گرفته باشند یا برعکس در مکانهای f-۶.

چندصد ترکیب باساختارنوع NaCl وجود دارند؛ مثلا با MgO، NiO، FeO (شکل ۴-۳-۲)، و MnS در صنعت بیشتر از همه برخورد می‌کنیم. قبلا در رابطهٔ (۳-۲-۴) مشاهده کردیم که ثابت شبکهٔ $a$ برابر است با دوبرابر مجموع دوشعاع، $2(r+R)$، زیرا یونهای مشابه باهم «تماس» دارند در صورتی‌که یونهای مشابه باهم تماس ندارند. کمینهٔ نسبت شعاع، $r/R$ برای این ساختار برابر ۴۱ر۰ است (جدول ۲-۶-۱). نسبت بیشینه وجود ندارد؛ ولی در ترکیبات یونیی که در آنها $r/R >$ ۷۳ر۰ است معمولا ساختارهای نوع CsCl پایدارترند.

**ساختار AX (نوع ZnS).** یکی از مکانهای f-۴ در شبکهٔ fcc اتمها نیز در شکل ۸ـ۲ـ۲ نشان داده شده است. در ساختار نوعی از ترکیبات ممکن است اتمهای X در مکانهای

$$0,0,0 \quad \frac{۱}{۲},\frac{۱}{۲},0 \quad \frac{۱}{۲},0,\frac{۱}{۲} \quad 0,\frac{۱}{۲},\frac{۱}{۲}; \qquad (۸ـ۲ـ۲)$$

و اتمهای A در مکانهای

$$\frac{۳}{۴},\frac{۳}{۴},\frac{۳}{۴} \quad \frac{۱}{۴},\frac{۱}{۴},\frac{۳}{۴} \quad \frac{۱}{۴},\frac{۳}{۴},\frac{۱}{۴} \quad \frac{۳}{۴},\frac{۱}{۴},\frac{۱}{۴}^{*} \qquad (۸ـ۲ـ۴، الف)$$

قرار داشته باشد.

برای اولین بار در فصل ۵، در ترکیبات نیمرسانا باساختار نوع ZnS برخورد کردیم [شکل ۵ـ۴ـ۳ (ب)]. این ساختار درآن مورد، قابل‌قبول بود زیرا این ترکیبات برای داشتن پیوند کووالانسی مستلزم ۴ = CN هستند. در حقیقت علت اینکه بیشتر ترکیبات نوع ZnS این ساختار را دارند این است که شرایط پیوند کووالانسی را فراهم‌کنند و نه به‌علت آنکه نسبت یون $r/R$ درآنها کم است.

شکلهای ۵ـ۴ـ۳(ب) و ۸ـ۲ـ۲ اساس شکل ۸ـ۲ـ۴ هستند. ازاین‌شکل‌می‌توان مجموع $(r+R)$ را به‌ثابت شبکهٔ $a$ مربوط کرد زیرا مکانهای f-۴ در سلول واحد در محلهای ۱/۴ قرار می‌گیرند

$$(r+R)^{۲}=\left(\frac{a}{۴}\right)^{۲}+\left(\frac{a}{۴}\right)^{۲}+\left(\frac{a}{۴}\right)^{۲}$$

$$a=\frac{۴(r+R)}{\sqrt{۳}} \qquad (۸ـ۲ـ۵)$$

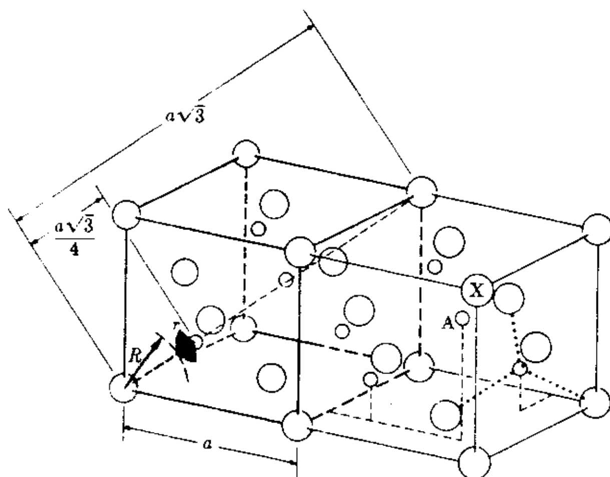
□ **ساختار AX (غیرمکعبی).** تمام‌ترکیبات AX مکعبی‌نیستند. دومثال ساده در این‌مورد ترکیباتی‌اند که اتمهای X آنها آرایهٔ hcp دارند. در ساختار نوع NiAs، اتمهای A در تمام محلهای بین نشینی f-۶ قرار دارند. ساختار نوع ZnO، اتمهای A در وسط مکانهای f-۴ قرار می‌گیرند (جدول ۸ـ۲ـ۱). در فصل ۳ گفته شد که در فلزات fcc و hcp ضریب فشردگی مساوی (۰٫۷۴) است و عدد کوئوردیناسیون آنها یکسان (۱۲)

---

* یا شق دیگر، در محلهای

$$\frac{۱}{۴},\frac{۱}{۴},\frac{۱}{۴} \quad \frac{۳}{۴},\frac{۳}{۴},\frac{۱}{۴} \quad \frac{۳}{۴},\frac{۱}{۴},\frac{۳}{۴} \quad \frac{۱}{۴},\frac{۳}{۴},\frac{۳}{۴} \qquad (۸ـ۲ـ۴، ب)$$

در هرسلول واحد fcc هشت محل f-۴ وجود دارد. بنابراین فقط نیمی‌از اینها توسط ترکیبات AX اشغال شده است، زیرا در هرسلول واحد فقط چهارمکان fcc وجود دارد.




**شکل ۸-۲-۴** ساختار AX (نوع ZnS) این شکل را با شکلهای ۵-۴-۳ (ب) و ۸-۲-۲ مقایسه کنید. هراتم A بین چهاراتم X (و هر اتم X بین چهار اتم A) قرار دارد. در هرسلول واحد فقط چهارمکان از هشت مکان f-۴ پرشده است. ثابت شبکه $a$ برابر است با $۴(r+R)/\sqrt{۳}$.

است. تنها اختلاف آنها در تکرار صفحات اتمی است. دراینجا نیز به همین ترتیب ساختارهای NaCl و NiAs و ساختارهای ZnS و ZnO به هم مربوط اند. ولی درهر صورت تقارن نوع hcp از نوع مکعبی کمتر است. بنابراین FeS (با ساختار نوع NiAs) بسیار سخت و شکننده است؛ درعوض MnS (باساختار نوع NaCl) جزء ترکیبات انعطاف پذیرتر AX است.

**مثال ۸-۲-۱** ترکیب CsBr همان ساختار CsCl را دارد. مراکز دو یون متفاوت ۰٫۳۷ nm فاصله دارد. الف) چگالی CsBr چقدراست؟ ب) شعاع یونهای $Br^-$ در این ساختار چقدر است؟

حل:

الف)
$$a=\frac{۲(۰٫۳۷\,\mathrm{nm})}{\sqrt{۳}}=۰٫۴۲۷\,\mathrm{nm}$$

با به‌دست آوردن جرمهای اتمی از شکل ۲-۱-۱

$$\rho=\frac{(۱۳۲٫۹+۷۹٫۹\,\mathrm{g})/(۰٫۶۰۲\times ۱۰^{۲۴})}{(۰٫۴۲۷\times ۱۰^{-۹}\mathrm{m})^{۳}}=۴٫۵\times ۱۰^{۶}\mathrm{g/m^{۳}}$$

**جدول ۸-۲-۱ فشردگی ترکیبات AX**

| ساختار | شبکه اتمهای X | اتمهای A: مکانهای بین‌نشینی | اتمهای A: مکانهای پرشده | مثالهای دیگر |
|---|---|---|---|---|
| CsCl | sc | مکانهای 8-f | همه | |
| NaCl | fcc | مکانهای 6-f | همه | MgO, MnS, LiF |
| ZnS* | fcc | مکانهای 4-f | $\frac{1}{2}$ | β-SiC, CdS, AlP |
| NiAs | hcp | مکانهای 6-f | همه | FeS, MnTe |
| ZnO | hcp | مکانهای 4-f | $\frac{1}{2}$ | BeO, ZnS*, AlN |

* ZnS مانند بسیاری از ترکیبات سرامیکی بیش‌از یك چندشکلی دارد. چند شکلی مکعبی اسفالریت (یا بلند) نامیده می‌شود که از نام فراوانترین کانی روی نشأت می‌گیرد. چند شکلی منشور شش‌بر، وورتزیت نام دارد.

$$= ۴٫۵\,\mathrm{Mg/m^3} \quad (\text{یا } ۴٫۵\,\mathrm{g/cm^3})$$

ب) با استفاده از پیوست (ب)، وقتی $CN=۶$، $r_{Cs^+} = ۰٫۱۶۷\,\mathrm{nm}$

$$R_{Br^-} = ۰٫۲۷\,\mathrm{nm} - \frac{۰٫۱۶۷\,\mathrm{nm}}{۰٫۹۷} = ۰٫۲۰\,\mathrm{nm}$$

توضیح. این شعاع برای $CN=۸$ است. $R_{Br^-}$ درساختار $CN=۶$ تقریباً برابر است با $۰٫۱۹\,\mathrm{nm}$. ▲

**مثال ۸-۲-۲** چگالی FeO را که ساختاری از نوع NaCl دارد حساب کنید. (فرض کنید تعداد یونهای Fe و O مساوی است.)

حل: از جدول ۲-۵-۱، یا پیوست (ب)

$$R_{O^{2-}} = ۰٫۱۴۰\,\mathrm{nm} \quad \text{و} \quad r_{Fe^{2+}} = ۰٫۰۷۴\,\mathrm{nm}$$

که در آن $CN=۶$. در هر سلول واحد $۴Fe^{2+}$ و $۴O^{2-}$ وجود دارد. (شکل ۸-۲-۳ را ببینید.) پس

$$V=a^3=[2(0.074+0.140)\times 10^{-9}\text{m}]^3$$
$$=78.4\times 10^{-30}\ \text{m}^3$$
$$m=\frac{4(55.8+16.0\ \text{amu})}{(0.6\times 10^{24}\text{amu/g})}$$
$$=479\times 10^{-24}\text{g}$$
$$\rho=m/V=\frac{479\times 10^{-24}\text{g}}{78.4\times 10^{-30}\text{m}^3}=6.1\times 10^6\ \text{g/m}^3\ \ (\text{یا}\ 6.1\ \text{g/cm}^3)$$

توضیح. چگالی اندازه‌گیری شده تقریبا ۵٫۷ $g/cm^3$ است زیرا این ساختار دارای تهیجایهایی در محل کاتیونهاست (شکل ۴—۳—۲ و مثال ۴—۳—۱). ▲

**مثال ۸-۲-۳** ترکیب CdS همان ساختار ZnS را دارد. مراکز دویون متفاوت ۰٫۲۵ nm از هم فاصله دارد. الف) حجم سلول واحد چقدر است؟ ب) چگالی چقدر است؟

حل:

$$a=\frac{4(r+R)}{\sqrt{3}}$$
$$=\frac{4(0.25)}{\sqrt{3}}=0.577\,\text{nm}$$

الف)
$$a^3=0.192\ \text{nm}^3$$

ب) از آنجاکه $\text{Cd}=112.4\,\text{amu}$، و $\text{S}=32.2\,\text{amu}$ (شکل ۲—۱—۱)

$$\rho=\frac{4(144.5\ \text{g}/0.6\times 10^{24})}{(0.577\times 10^{-9}\text{m})^3}=5.0\ \text{Mg/m}^3\ (\text{یا}\ 5.0\ \text{g/Cm}^3)$$ ▲

**مثال ۸-۲-۴** MnS سه‌تاچندشکلی‌دارد. دونوع ازآن عبارت‌اند از الف) ساختار نوع NaCl (شکل۸—۲—۳) و ب) ساختارنوع ZnS (شکل۸—۲—۴). در صورتی که‌ساختار نوع دوم (ZnS) به‌ساختار نوع اول (NaCl) تبدیل شود چنددرصد تغییرحجم دیده می‌شود؟ (درمورد شعاع در حالت $CN=6$ به‌پیوست (ب) رجوع کنید ووقتی‌که $CN\neq 6$ است یانوشت پیوسته آن را ببینید.)

حل: هرسلول‌واحد (شکلهای ۸—۲—۳ و ۸—۲—۴) ۴ یون $Mn^{2+}$ و ۴ یون $O^{2-}$ دارد. بنابراین می‌توان یك‌سلول واحد از هرکدام را درنظر گرفت.

$V=a^3=[2(0.080+0.184\,nm)]^3=0.147\,nm^3$ (الف)

$V=a^3=\left[\frac{4(0.073+0.167\,nm)}{\sqrt{3}}\right]^3=0.170\,nm^3$ (ب)

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{b\to a}=-14v/o$$

توضیح. فقط نوع NaCl پایدار است، ولی دو چند شکلی دیگر با مواد اولیهٔ مناسب و روشهای خاص تبلور می‌توانند تشکیل شوند. ▲

## ۸-۳ بلورهای سرامیکی $A_mX_p$

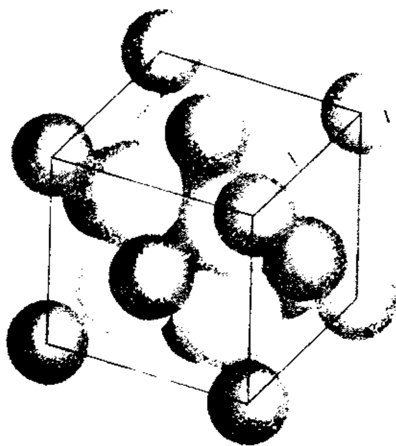
تمام ترکیبات دوتایی تعداد مساوی از اتمها (یا یونها)ی A و X ندارند. بین حالات مختلف، تنها دوحالت را برای نشان دادن نکات آن درنظر می‌گیریم، ساختار $CaF_2$ و ساختار $Al_2O_3$. فلوریت $CaF_2$، الگوی ساختار، $UO_2$ است که درسوختهای هسته‌ای به‌کار می‌رود و الگویی برای یکی از چندشکلیهای «$ZrO_2$» است که به‌عنوان اکسید دیرگدازاستفاده می‌شود. کراندم، $Al_2O_3$، یکی‌از متداولترین سرامیکهایی است‌که در صنعت کاربرد دارد. و از جمله کاربردهایش می‌توان از شمع اتومبیل (شکل ۲-۷-۳)، سنگ سنباده، پمپ اسیدی، زمینهٔ مدارهای چاپی [شکل ۸-۱-۱ (الف)] و مواد دما بالا برای نگهدارنده‌های کاتالیزور در سیستم اگزوز [شکل ۸-۱-۱ (ب)] نام برد.

ساختار «$CaF_2$» در مکانهای fcc: ۰, ۰, ۰؛ ۱/۲, ۱/۲, ۰؛ ۱/۲, ۰, ۱/۲؛ و ۰, ۱/۲, ۱/۲ کاتیون $Ca^{2+}$ دارد. آنیونهای $F^-$ در مکانهای f-۴ بین‌نشینی، بین کاتیونها قرار دارند و شامل هر دو مجموعه در روابط (۸-۲-۴ الف و ب) هستند. این نسبت ۴ به ۸ $Ca^{2+}$ به $F^-$ با نسبت ۱ به ۲ برای m به p در $A_mX_p$ مطابقت دارد. در شکل ۸-۳-۱ نمونه‌ای از آن دیده می‌شود.

ساختاری که شرح دادیم fcc با یون $F^-$ در مکانهای f-۴ بین یونهای $Ca^{2+}$ است. علاوه براین، یونهای کلسیم بین هشت یون فلوئور قرار دارند. ولی توجه داشته باشید که تمام مکانهای f-۸ اشغال نشده‌اند؛ مثلا آنهایی که درمرکز سلول واحد قرار دارند (شکل ۸-۳-۱) وآنهایی که در وسط ضلعهای سلول واحد قرار می‌گیرند. این مکانهای خالی در $UO_2$ که به‌عنوان سوخت هسته‌ای به‌کار می‌رود و دارای این ساختار بلوری است اهمیت‌دارد. زیرا این سوراخها، فضایی برای محصولات‌شکافت‌هسته‌ای‌اند.*

---

* اگر فلز اورانیم به‌عنوان سوخت مصرف شود، وقتی اتمها به‌دو یا چند دختر ـ اتم تقسیم می‌شوند انبساط‌بسیاری به‌وجود می‌آید زیرا بلور فلزی، مکانهای‌خالی قابل‌مقایسه‌ای ندارد.



**شکل ۸-۳-۱** ساختار $AX_۲$ (نوع $CaF_۲$). اتمهای A درشبکهٔ fcc قرار دارند واتمهای X تمام‌مکانهای بین‌نشینی بین‌اتم را اشغال کرده‌اند. (در مرکز سلول واحد اتمی وجود ندارد.) در شکل ۸ـ۳ـ۲ دیده می‌شود که یونهای $F^-$ باهم تماس ندارند.

آخرین ترکیب دوتایی که موردنظر قرار می‌دهیم، ساختار $Al_۲O_۳$ است. آرایهٔ یونهای $O^{۲-}$ درآن hcp است. دوسوم مکانهای بین‌نشینی f-۶ توسط یونهای $Al^{۳+}$ اشغال شده‌اند.* درحالی‌که فاصلهٔ بین اتمی یونهای $^{+۳}$ و $^{-۲}$ آلومینیم و شش اکسیژن مجاور آن فقط $۰٫۱۹۱\,nm$ است و انتظار داریم که انرژی پیوند بالا باشد.** این‌امر در دمای ذوب ($>۲۰۰۰\,°C$)، سختی ($Mohs=۹$)، و مقاومت $Al_۲O_۳$ در برابر بسیاری از مواد شیمیایی منعکس می‌شود. علاوه براین ترکیب رسانندگی الکتریکی کم و رسانندگی گرمایی نسبتاً بالا (پیوست ج) موجب شده است که $Al_۲O_۳$ برای بسیاری از کاربردهای الکتریکی مناسب باشد.

**مثال ۸-۳-۱** ثابت‌شبکهٔ $CaF_۲$ برابر $۰٫۵۴۷\,nm$ است. الف) آرایش یونها را روی صفحهٔ (۱۱۰) $CaF_۲$ رسم کنید. ب) جمع دوشعاع ($r_{Ca^{۲+}}+R_{F^-}$) چقدر است؟□ ج) چگالی خطی مکانهای معادل درجهت $[۱\bar{۱}۲]$ چقدر است؟

حل: الف) شکل ۸ـ۳ـ۲، نشاندهندهٔ صفحهٔ (۱۱۰) است که در شکل ۸ـ۳ـ۱ رسم شده است.

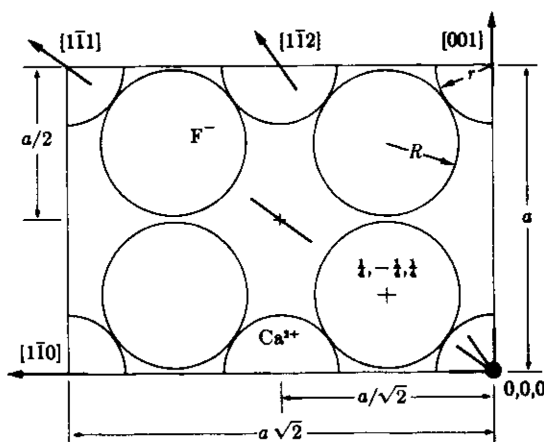
ب)
$$r+R=\sqrt{\left(\frac{a}{۴}\right)^۲+\left(-\frac{a}{۴}\right)^۲+\left(\frac{a}{۴}\right)^۲}=\frac{a\sqrt{۳}}{۴}$$

$$=(۰٫۵۴۷\,nm)\frac{\sqrt{۳}}{۴}=۰٫۲۳۷\,nm$$

---

* این‌کار ساختار را بسیار ساده می‌کند، زیرا اعوجاج حاصل از این مکانهای خالی f-۶ به‌حساب نیامده است.

** با توجه به‌رابطهٔ (۲ـ۵ـ۱)، نیروی جاذبهٔ کولنی با $Z_۱Z_۲/a_۱^۲$ـ متناسب است که درآن $Z_۱$ و $Z_۲$ نشاندهندهٔ ظرفیت‌اند.




**شکل ۸-۳-۲** ساختار $CaF_2$. [صفحهٔ (۱۱۰).] (مثال ۸-۳-۱ را ببینید.)

□ج) چون $CaF_2$، fcc است، برداری که از ۰، ۰، ۰ به نقطهٔ «۲/۱، ۲/۱ -، ۱» رسم شود همان فاصله تکرار شونده است،

$$\sqrt{a^2+\left(-\frac{a}{2}\right)^2+\left(\frac{a}{2}\right)^2}$$

بنابراین

$$t=a\sqrt{1.5}=0.547\,nm\,(1.225)=0.67\,nm$$

$$\text{چگالی خطی} = 1.49/nm\ (\text{یا}\ 1.5\times 10^6/mm)$$

توضیح. یونهای $F^-$ تقریباً ۰٫۲۷ nm از هم فاصله دارند (شکل ۸-۳-۲).
داده‌های پیوست (ب) نشان می‌دهد که $a=0.515$ nm؛ ولی دافعهٔ متقابل یونهای $8F^-$ در اطراف مکانهای خالی 8-f در نظر گرفته نشده‌است. این دافعه ساختار را منبسط می‌کند.

این‌همان ساختار $UO_2$ است. مکانهای پرنشده 8-f فضایی برای محصولات شکافت هسته‌ای فراهم می‌آورند تا این محصولات درون بلور باقی بمانند. ▲

□ **مثال ۸-۳-۲** اورانیم دی‌اکسید، ساختار $CaF_2$ را دارد. بنابراین دارای مکان بین‌نشینی بزرگی درمرکز سلول واحد است (شکل ۸-۳-۲ را ببینید). الف) در هرسلول واحد چندحفره از این نوع وجود دارد؟ ب) با استفاده از داده‌های تصحیح شدهٔ پیوست (ب) نسبت شعاعها، $r/R$، در $UO_2$ چقدر است؟

حل: الف) سلول واحد fcc است، بنابراین چهارمکان خالی معادل وجود دارد که

عبارت‌اند از ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲ و جایگشتهای $\pm a/2$، ۰، $\pm a/2$ (بخش ۳-۵).
این مکانها شامل مکانهای خالی مرکز و نقاط وسط تمام یالهای سلول واحد است (که هر یك به‌نوبهٔ خود به ۴ سلول‌واحد پیوسته‌اند.) که درمجموع تعداد آنها به ۴ = ۱۲/۴ + ۱ می‌رسد. ب) از آنجا که اعداد کوئوردیناسیون آنها به‌ترتیب برابر ۸ و ۴ است، داریم

$$r_{U^{4+}} = \frac{0.097\ \mathrm{nm}}{0.97} = 0.100\ \mathrm{nm} \quad \text{و} \quad R_{O^{2-}} = \frac{0.140\ \mathrm{nm}}{1.1} = 0.127\mathrm{nm}$$

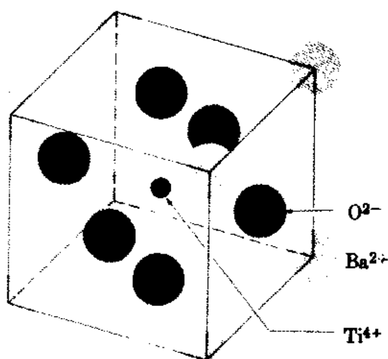
$$\frac{r}{R} = 0.79$$

توضیح. ساختاری با ۶ = CN (و بنابراین ۰٫۶۹ = $0.097\mathrm{nm}/0.140\ \mathrm{nm}$) برای $UO_2$ پیشنهاد می‌شود. ولی با این کوئوردیناسیون دواتم نمی‌توانند نسبت ۱ به ۲ داشته باشند.
▲

## ۸-۴ ترکیبات چندتایی

ساختارهای نوع $A_mB_nX_p$ اگرچه وجود سه‌نوع اتم غالباً موجب پیچیدگی بیشتر ساختار می‌شود، در اینجا چند ترکیب قابل توجه از «$A_mB_nX_p$» بررسی می‌شوند. اولین نوع «$BaTiO_3$» است که الگوی اولیه‌ای برای آن‌دسته از مواد سرامیکی است که ازجمله کاربردهایشان کاربریج گرامافون است. بالاتر از ۱۲۰ °C سلول واحد $BaTiO_3$ مکعبی است که در آن یونهای $Ba^{2+}$ در گوشه‌ها، یونهای $O^{2-}$ در مراکز وجوه، و یك‌یون $Ti^{4+}$ درمرکز سلول واحد قرار گرفته است (شکل ۸-۴-۱). این ساختار زیر ۱۲۰ °C اندکی تغییر می‌کند. با این تغییر تبدیل به‌مادهٔ پیزوالکتریك مفیدی می‌شود (بخش ۸-۶).

مغناطیسهای غیرفلزی ممکن است از ترکیبات $A_mB_mX_p$ باشند که متداولترین آنها




**شکل ۸-۴-۱** ساختار مکعبی $BaTiO_3$. این ساختار بالای ۱۲۰ °C پایدار است و در این‌حالت یون $Ti^{4+}$ درمرکز مکعب، یونهای $Ba^{2+}$ در رئوس و یونهای $O^{2-}$ در مراکز وجوه قرار دارند.

فرواسپینلی است (که غالباً فریت نامیده می‌شود). ترکیب فرواسپینل $MFe_2O_4$ است که در آن M نشاندهندهٔ کاتیونهای دو ظرفیتی باشعاع nm ۰٫۰۱±۰٫۰۷۵ است. در این ساختارهـای اسپینل f-۴ یونهای $O^{2-}$ آرایهٔ (fcc) متراکمی به‌وجود مـی آورند کـه کاتیونها در نیمی از مکانهای f-۶ و دریك هشتم مکانهای بین‌نشینی f-۴ قرار مـی گیرند (شکل ۸–۲–۲). موقعیت کاتیونها در ویژگی آهنربایی این مواد مؤثر است.

□ **محلولهای جامد.** دربارهٔ محلولهای جامد در ترکیبات یونی به‌طور خلاصه در بخش ۴–۳ بحث شد و معلوم شد که برای تشکیل محلولهای جامد دوعامل بسیارمهم وجود دارد: (۱) سازگاری در اندازهٔ اتمی و (۲) مـوازنهٔ بارالکتریکی. البته این عوامل آنقدرهـا محدودکننده نیستند زیرا موازنهٔ بـار می‌تواند انجام شود. مثلا، در MgO یونهای $Li^+$ ممکن‌است جانشین یونهای $Mg^{2+}$ شوند واین به‌شرطی است که همزمان $F^-$ نیز موجود باشد کـه جانشین $O^{2-}$ شود. برعکس، MgO ممکن است در LiF حـل شود. همچنین $Mg^{2+}$ ممکن است در LiF حل‌شود بـدون اینکـه تعداد کافی ازیونهای $O^{2-}$ موجود باشد که البته دراین‌صورت تهیجایهایی کاتیونی به‌وجودمی‌آید یعنی به‌جای هر «$2Li^+$» یك «$Mg^{2+}+\square$» قرار می گیرد.

محلولهای جامد با «اسپینلهای مغناطیسی» پیشگفته برای کسانی کـه باسرامیك کار می‌کنند اهمیت‌زیادی دارند زیرا خواص مغناطیسی بهینه هنگامی حاصل می‌شودکه قسمتی از یـونهای دو ظرفیتی روی ($r=0.074$ nm) باشد و مـوازنهٔ آنها به‌وسیلهٔ یونهای فرومغناطیسی مثل $Ni^{2+}$ ($r=0.069$ nm) است. انجام گیرد و این، حالت ساده‌ای از جایگزینی مستقیم‌است، باوجود این برای برخی کاربردهـا بهتر است به‌جـای $2M^{2+}$، جفت $Li^+Fe^{3+}$ یا به‌جای $2Fe^{3+}$، جفت $Mg^{2+}Ti^{4+}$ جایگزین شود.

**مثال ۸–۴–۱** شبکهٔ نوعی فرواسپینل ۳۲ یون اکسیژن، ۲۴ یون‌فریك و ۸ یون دوظرفیتی دارد. (برای‌تعیین الگوی تکرار شونده توجه کنیدکه هرسلول واحدآن هشت برابر سلول واحد MgO یون اکسیژن دارد). اگر کسر تعداد یـونهای دوظرفیتی $Zn^{2+}$ و $Ni^{2+}$ برابر ۳/۵ باشد، برای‌این‌عمل چه‌کسر وزنی از ZnO و NiO و $Fe_2O_3$ را باید باهم مخلوط کرد؟

حل: ۸ مول $Fe_2O_3$ : مبنا

$$5\,NiO + 3\,ZnO + 8\,Fe_2O_3 \rightarrow (Zn_3, Ni_5)\,Fe_{16}O_{32}$$

کسر وزنی

$$5\,NiO = 5(58.71+16.00) = 373.5 = 0.197$$
$$3ZnO = 3(65.37+16.00) = 244.1 = 0.129$$
$$8Fe_2O_3 = 8[2(55.85)+3(16.00)] = 1277.6 = 0.674$$

۱۸۹۵٫۲ ۱٫۰۰۰

▲

□ **مثال ۸-۴-۲** محلول جامد MgO و LiF حاوی ۱۱ درصد وزنی اکسیژن، ۵۲ F، ۲۰ Mg و ۱۷ Li است. درهر ۲۰۰ سلول واحد چندتهیجای وجود دارد؟

حل: نسبتهای اتمی را می‌توان از وزنهای اتمی محاسبه کرد

$$\text{اکسیژن}: \frac{11}{16} = 0.688$$

$$\text{فلوئور}: \frac{52}{19} = 2.737$$

$$\text{منیزیم}: \frac{20}{24.31} = 0.823$$

$$\text{لیتیم}: \frac{17}{6.94} = 2.450$$

ساختار از نوع NaCl است؛ بنابراین ۲۰۰ سلول واحد دارای ۸۰۰ آنیون (و ۸۰۰ مکان کاتیون) است

آنیون ۸۰۰

$$\text{اکسیژن}: 800(0.688)/(0.688+2.737) = 160.7$$

$$\text{فلوئور}: 800(2.737)/(0.688+2.737) = 639.3$$

براساس فلوئور

کاتیون ۷۶۴٫۵

$$\text{منیزیم}: 0.823(639.4/2.737) = 192.2$$

$$\text{لیتیم}: 2.450(639.3/2.737) = 572.3$$

$$\text{تهیجایهای کاتیونی} = 800 - 764.5 = 35.5/200 \text{ سلول واحد}$$

توضیح. نفوذ کاتیون در این محلول‌جامد بسیار سریعتر از LiF یا MgO است. ▲

## ۸-۵ سیلیکاتها

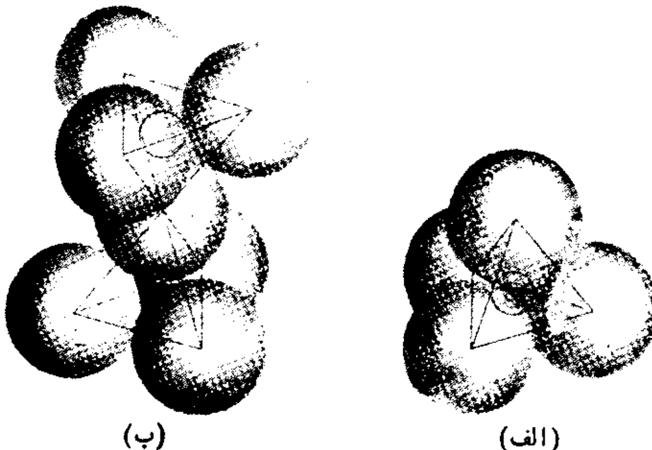
بسیاری از مواد سرامیکی حاوی سیلیکات‌اند زیرا سیلیکاتها فراوان و ارزان و در ضمن برخی خواص آنها از نظر مهندسی مورد توجه است. شاید معروفترین سیلیکات، سیمان پرتلند باشد که قادر است توده‌هایی از صخره‌ها را بههم پیوند دهد و به‌صورت یکپارچه درآورد. بسیاری از مواد ساختمانی دیگر چون آجر، موزائیك، شیشه (شکل ۸-۱-۱)، و لعاب شیشه‌ای نیز از سیلیکاتها ساخته می‌شوند. سایر کاربردهای مهندسی سیلیکاتها عبارت‌اند از عایقهای الکتریکی، ظروف شیمیایی، و الیاف شیشه‌ای تقویت‌کننده.

**واحدهای چهاروجهی سیلیکات.** واحد اصلی‌ساختاری سیلیکاتها، چهاروجهی «$SiO_4$»

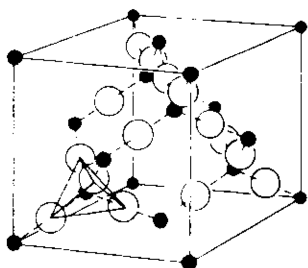
است و [شکل ۸-۵-۱(الف)]، که در آن یك‌اتم سیلیسیم بین‌چهار اتم اکسیژن به‌صورت بین‌نشینی قرار گرفته است. نیروهایی که‌این چهار وجهیهارا به‌هم پیوند می‌دهد هم‌پیوند یونی وهم پیوند کووالانسی را شامل می‌شود. درنتیجه اتصال چهاروجهی بسیار محکم است. ولی با وجود هردومکانیسم پیوند یونی وکووالانسی، هراکسیژن‌چهاروجهی به‌جای هشت الکترون در مدار آخر فقط هفت‌الکترون دارد.

کمبود الکترون را در یونهای اکسیژن به‌دو طریق می‌توان جبران کرد: (۱) از اتمهای فلزدیگر الکترون به‌دست‌آورد که در این‌صورت یونهای $SiO_4^{4-}$ و فلز $^+$ حاصل می‌شود. (۲) هراکسیژن بایك سیلیسیم دیگر جفت الکترون به‌اشتراك بگذارد و در این حالت گروههای کوئوردیناسیون چهاروجهی متعددی پدید می‌آید [شکل ۸-۵-۱(ب)]. اکسیژن به‌اشتراك گذاشته شده اکسیژن پلساز است.

**سیلیکاتهای مشبك.** در $SiO_2$ خالص یون‌فلزی موجودنیست. هر اتم اکسیژن اتم پلسازی بین دواتم سیلیسیم است (و مطابق باشکل ۵-۸-۲، هر اتم سیلیسیم بین چهاراتم اکسیژن واقع است) در این‌حالت ساختار مشبکی به‌وجود می‌آید. همچنان‌که کربن می‌تواند به‌دو شکل گرافیت یا الماس‌درآید، سیلیس ($SiO_2$) نیز می‌تواند چند ساختار بلوری مختلف داشته‌باشد. ساختاری که درشکل۸-۵-۲ دیده‌می‌شود در دماهای بالا وجود دارد. ساختار معمولیتر سیلیس، کوارتز است که به‌صورت ماسه در سواحل یافت می‌شود. کوارتز نیز




**شکل ۸-۵-۱** الف) آرایش چهار وجهی $SiO_4^{4-}$، در مقایسه با شکل ۲-۵-۳ (ب) یونهای $SiO_4^{4-}$ از منابع دیگر چهار الکترون به‌دست آورده‌اند؛ ب) واحدچهاروجهی دوگانه $(Si_2O_7)^{6-}$، اتم‌اکسیژن‌مرکزی درهر واحد چهار وجهی به‌اشتراك گذاشته شده است. بنابراین به صورت اکسیژن پلساز درمی‌آید.



**شکل ۸-۵-۲** ساختار مشبك ($SiO_2$). هر اتم سیلیسیم باچهار اتم اکسیژن احاطه شده است و هر اتم اکسیژن عضو دو چهاروجهی $SiO_4$ است (بەشکلهای ۸-۲-۴ و ۵-۴-۳ رجوع کنید)، این شکل دیگر از سیلیس، کریستوبالیت نام دارد.

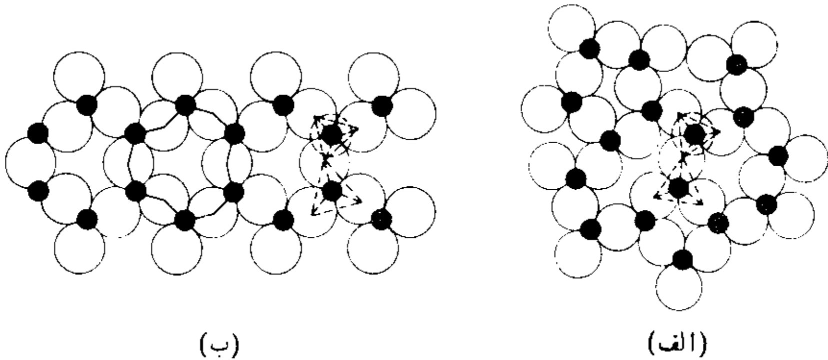
مانند $SiO_2$ در شکل ۸-۵-۲ دارای چهار وجهیهای $SiO_4$ است ولی شبکه‌اش پیچیده‌تر است.

فلداسپار نوع دیگری ازسیلیکاتهای طبیعی است. این کانی صورتی رنگ یا قهوه‌ای مایل به زرد، گرانیت، $KAlSi_3O_8$ است که آن را می‌توان سیلیکاتی شبکه‌ای درنظر گرفت که به‌جای یکی ازچهار سیلیسیم آن یك یون $Al^{3+}$ جایگزین شده است. در مقایسه با سیلیسیم که ۴ بار دارد Al دارای سه‌بار است. بنابراین وجود $K^+$ موجب موازانهٔ بار می‌شود. یونهای $K^+$ یونهای بین‌نشین‌اند باوجود این ساختارهای مشبك کاملا بازند و می‌توانند یونهای اضافی را درخود جای دهند (به‌شکل ۸-۵-۲ رجوع کنید).

**شیشه‌ها.** سیلیکاتها، شیشه‌های تجارتی اصلی‌اند، که شامل چهاروجهی $SiO_4$ ذکرشده در بخش قبل، به‌اضافهٔ برخی یونهای اصلاح‌کننده‌اند. این شیشه‌ها، بی‌شکل یعنی غیربلوری‌اند. درشکل ۸-۵-۳ ساختار بلوری با ساختار جامد بی‌شکل مقایسه شده است، در هردو اولین اتمهای همسایه یکسان‌اند یعنی هراکسیژن بین دواتم سیلیسیم قرارگرفته است و دو چهاروجهی را به‌هم پل می‌زند. هر سیلیسیم بین چهار اکسیژن واقع است (اکسیژن‌چهارم بالا یا پایین‌صفحهٔ کاغذ قرار دارد و دیده نمی‌شود). ولی درشیشه تفاوتها از همسایه‌های دورتر ناشی می‌شوند، شیشه برخلاف سیلیس بلوری الگویی بانظم پردامنه ندارد.

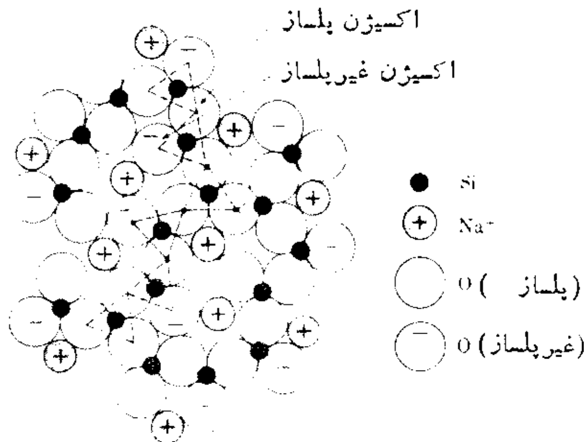
هرگاه فقط سیلیس ($SiO_2$) وجود داشته باشد و هراکسیژن به‌صورت پل، دوچهاروجهی را به‌هم مربوط کند، شیشه بسیارصلب‌خواهد بود. مثلا سیلیس مذاب حتی درگسترهٔ دماهایی که مایع واقعی است فوق‌العاده ویسکوز است. به‌اصطلاح پلی‌مری، واحدهای آن چندعاملی وساختار شبکهٔ آن اتصالات متقاطع‌زیادی دارد. به‌دلیل کم‌بودن انبساط گرمایی، سیلیس مذاب کاربردهای زیادی دارد ولی به‌دلیل ویسکوزیتهٔ زیاد، شکل‌دادن آن بسیار سخت است.

**اصلاح‌کننده‌های ساختار مشبك.** بیشتر شیشه‌های سیلیسی شامل اصلاح‌کنندهٔ شبکه‌اند. این مواد اکسیدهایی چون CaO و $Na_2O$ هستند که در ساختار، کاتیون (یون‌مثبت) به‌وجود می‌آورند. مطابق با شکل ۸-۵-۴، اضافه کردن $Na_2O$ به‌شیشه دویون $Na^+$ و دو اکسیژن غیرپلساز، که هرکدام یك‌بار منفی دارند، به‌وجود می‌آورد. این اکسیژنها فقط

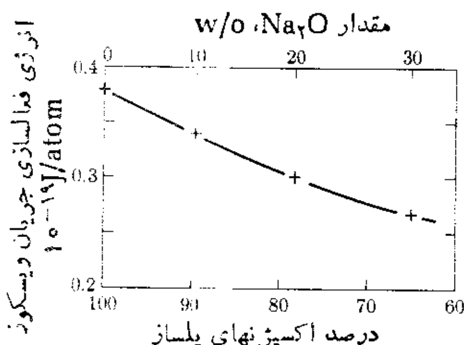



**شکل ۸-۵-۳** نمایش دو بعدی الف) شیشهٔ‌سیلیسی و ب) سیلیس بلوری در دمای اتاق. هردو ساختار مشبك بـا نظم کم دامنه دارند. فقط سیلیس بلوری ترتیب شبکه‌ای بـا نظم پردامنه دارد. (اکسیژن چهارم بالا یا پایین اتم سیلیسیم قرار می‌گیرد و دراینجا نشان داده نشده است.) اکسیژن بین چهاروجهیهای مجاور به‌عنوان کل عمل می‌کند.

به‌یك اتم سیلیسیم متصل‌انـد و به‌همین‌ترتیب اضافه‌کردن یك‌یون $Ca^{2+}$ نیز دو اکسیژن غیرپلساز به‌وجود می‌آورد. وجود این اکسیژنهای غیرپلساز انرژی فعالسازی لازم برای اتم، درحرکتی که موجب روان‌شدن شیشهٔ مذاب می‌شود، را کاهش می‌دهد. این مطلب در شکل ۸-۵-۵ در مورد شیشه‌ها برای افزایش مقدار $Na_2O$ (و بنابراین افزایش نسبت




**شکل ۸-۵-۴** ساختارشیشهٔ‌سوداسیلیسی. افزودن $Na_2O$ به‌شیشهٔ‌سیلیسی تعداد اتمهای اکسیژن پلساز را کم می‌کند. هراکسیژن غیرپلساز یك‌بار منفی حمل‌می‌کند (مطابق‌باشکل ۸-۵-۳ اکسیژن‌چهارم هرچهاروجهی، برای سادگی‌حذف شده‌است). این شیشه در دماهای بالا از شیشه سیلیسی شکل ۸-۵-۳ (الف) ویسکوزیتهٔ کمتری دارد.




**شکل ۸-۵-۵** انرژی جریان ویسکوز برحسب اکسیژنهای پلساز (شیشه‌های $Na_2O-SiO_2$). انرژی فعالسازی لازم برای جریان ویسکوز با افزایش درصد اتمهای اکسیژن مشترك بین چهار وجهیهای مجاور افزایش می‌یابد.

اکسیژنهای غیرپلساز(دیده می‌شود.

در شیشه‌های تجارتی که حاوی سودا و آهك‌اند کمتراز سه‌چهارم اتمهای اکسیژن به‌صورت پل بین چهاروجهی $SiO_4$ قرار گرفته‌اند. بنابراین بعضی از واحدها مستقیماً فقط به‌دوچهاروجهی دیگرمتصل‌اند. در نتیجه شیشه در دمای بالا گرمانرم است و می‌تواند به‌صورت محصولاتی مانند حباب لامپ، شیشهٔ پنجره، ورشته‌هایی که درحین سردشدن سخت می‌شوند شکل داده شود.

هزاران نوع شیشهٔ تجارتی وجود دارد، زیرا بیشتر ازیك دوجین جزء مختلف وجود دارند که می‌توانند در اندازه‌های مختلف به‌کار روند و خواص ویژه‌ای مانند شاخص شکست، طیف رنگ، یا ویسکوزیته به‌وجود آورند. جدول ۸-۵-۱ انواع مهم شیشه‌ها را نشان می‌دهد.

**مثال ۸-۵-۱** کوارتز ($SiO_2$) دارای چگالی $۲٫۶۵\ Mg/m^3$ ($= ۲٫۶۵\ g/cm^3$) است. الف) چه‌تعداد اتم سیلیسیم (واتم اکسیژن) درهر $m^3$ وجود دارد. ب) درصورتی که شعاع سیلیسیم واکسیژن به‌ترتیب $۰٫۰۳۸\ nm$ و $۰٫۱۱۴\ nm$ باشدضریب فشردگی چقدر است؟

حل:

الف)

$$SiO_2/m^3 = \frac{۲٫۶۵ \times ۱۰^{۶}\ g/m^3}{(۲۸٫۱ + ۳۲٫۰)g/(۰٫۶ \times ۱۰^{۲۴}\ SiO_2)}$$

$$= ۲٫۶۴۵ \times ۱۰^{۲۸}\ SiO_2/m^3$$

$$= ۲٫۶۴۵ \times ۱۰^{۲۸}\ Si/m^3 = ۵٫۲۹ \times ۱۰^{۲۸}\ O/m^3$$

**جدول ۸-۵-۱ انواع شیشه‌های معمولی تجارتی**

| نوع | اجزای اصلی، درصد وزنی $SiO_2$ | $Na_2O$ | $CaO$ | $Al_2O_3$ | $B_2O_3$ | $MgO$ | خواص لازم |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| پنجره | ۷۲ | ۱۴ | ۱۰ | ۱ | | ۲ | دوام زیاد |
| شیشهٔ جام (معماری) | ۷۳ | ۱۳ | ۱۳ | ۱ | | | دوام زیاد |
| مخزن | ۷۴ | ۱۵ | ۵ | ۱ | | ۴ | کارپذیری آسان، مقاومت شیمیایی |
| حباب لامپ | ۷۴ | ۱۶ | ۵ | ۱ | | ۲ | کارپذیری آسان |
| رشته (برق) | ۵۴ | | ۱۶ | ۱۴ | ۱۰ | ۴ | خاصیت قلیایی کم |
| پیرکس | ۸۱ | ۴ | | ۲ | ۱۲ | | انبساط گرمایی کم، تبادل یونی کم |
| سیلیس ذوب‌شده | ۹۹ | | | | | | انبساط گرمایی خیلی کم |

$$\frac{V_{Si}}{m^3} = (2.625 \times 10^{28}/m^3)\left(\frac{4\pi}{3}\right)(0.038 \times 10^{-9}\,m)^3 = 0.006\,m^3/m^3$$

ب)

$$\frac{V_{O}}{m^3} = (5.29 \times 10^{28}/m^3)\left(\frac{4\pi}{3}\right)(0.114 \times 10^{-9}\,m)^3 = 0.328\,m^3/m^3$$

ضریب فشردگی $= 0.33$

توضیح. اگرچه میزان فضای آزاد دراین ساختار قابل‌ملاحظه است، بیشتر اتمهای تکی (بجز هلیم) می‌توانند به‌صورت یون درمیان $SiO_2$ نفوذ‌کنند. بنابراین بارهای آنها مانع از حرکت قابل ملاحظه‌ای در دمای محیط می‌شود. ▲

**مثال ۸-۵-۲** شیشه‌ای حاوی ۸۰ درصد وزنی $SiO_2$ و ۲۰ درصد وزنی $Na_2O$ است. چه کسری از اکسیژن غیر پلساز است؟

حل:

$$\text{مبنا}: 100\,g = 80\,g\,SiO_2 + 20\,g\,Na_2O$$

$$80\,g\,SiO_2/[(28.1 + (2 \times 16.0)\,g/mole]$$
$$= 1.33\,mole\,SiO_2 \quad \text{یا} \quad 80.6\,m/o\,SiO_2$$

$$20\,g\,Na_2O/[((2 \times 23.0) + 16.0)\,g/mole]$$
$$= 0.32\,mole\,Na_2O \quad \text{یا} \quad 19.4\,m/o\,Na_2O$$

مبنای جدید: ۱۰۰ مول

$$80.6\,SiO_2 = 80.6\,Si + 161.2\,O$$
$$19.4\,Na_2O = \qquad 19.4\,O + 38.8\,Na^+$$
$$\overline{80.6\,Si + 180.6\,O + 38.8\,Na^+}$$

(با توجه به‌شکل ۸-۵-۴) دقت کنید که برای هر $Na^+$ اضافه شده یك اکسیژن غیرپلسازوجود دارد. بنابراین ۳۸٫۸ اکسیژن‌غیر پلساز (و ۱۴۱٫۸ اکسیژن‌پلساز) وجود دارد

$$\text{کسر اکسیژن غیرپلساز} = \frac{38.8}{180.6} = 0.215$$

توضیح. بـه‌شیشهٔ سودا ـ آهکی تجارتی کـه بـرای مخازن و... مصرف مـی‌شود (جدول ۸ـ۵ـ۱)، CaO نیز افزوده شده است. هریون $Ca^{2+}$ دواکسیژن غیر پلساز تولید می‌کنندکه هردو حامل یک‌بار منفی‌اند (به‌شکل ۸ـ۵ـ۴ رجوع کنید). ▲

**مثال ۸ـ۵ـ۳** به‌شکل ۸ـ۵ـ۲ رجـوع کنید و آن را بـا شکلهـای ۲ـ۳ـ۳ (الف) و ۲ـ۶ـ۱ (ب)، مقایسه کنید. زاویهٔ پیوند O — Si — O °۱۰۹٫۵ است. الف) نزدیکترین فاصلهٔ بین اکسیژنها (مرکز به مرکز) چقدر است؟ ب) نزدیکترین فاصلهٔ بین سیلیسیم‌هـا چقدر است؟ (در این‌حالت CN = ۲ ، $R_{O^{2-}} \approx$ ۰٫۱۱۴ nm.)

حل:

الف)

$$\frac{[\text{O-به-O}]/۲}{r+R} = \sin(۱۰۹٫۵°/۲) = ۰٫۸۲$$

$$\text{O-به-O} = ۲\left[\frac{۰٫۰۴۲\ \text{nm}}{۱٫۱} + ۰٫۱۱۴\ \text{nm}\right][۰٫۸۲] = ۰٫۲۵\ \text{nm}$$

ب) فرض کنیدکه زاویهٔ Si–O–Si، °۱۸۰ باشد (شکل ۸ـ۵ـ۲)

$$\text{Si-به-Si} = ۲\left[\frac{۰٫۰۴۲\text{nm}}{۱٫۱} + ۰٫۱۱۴\ \text{nm}\right] = ۰٫۳۰\ \text{nm}$$

توضیح. دربعضی ازچندشکلیهای‌سیلیس، برای آنکه الکترونهای تنها به‌دست‌آیند، زاویهٔ پیوند Si–O–Si به‌کمتراز °۱۸۰ کاهش می‌یابد. ▲

## ۸ـ۶ رفتار الکترومغناطیسی سرامیکها

سرامیکها به‌خـاطر کاربردشان به‌عنوان عایق الکتریکی به‌خـوبی شناخته شده‌اند. (شکل ۸ـ۶ـ۱). علاوه براین سرامیکهای مختلف به‌علت بـالا بودن ثابتهای دی‌الکتریك، اثرات پیزوالکتریك، یـا رفتار دی‌الکتریك آنهـا ممکن است نقشهـای مختلفی در مدارهـای الکترومغناطیسی داشته باشند. بالاخره، اکسید بیشتر عناصر انتقالی نیمرساناست.

**سرامیکهای دی‌الکتریك.** بسیاری از اکسیدها را می‌توان به‌عنوان عایقهای خوبی به‌کار برد زیرا الکترونهـای ظرفیتی اتم فلز به‌طور دائمی به‌اتمهای اکسیژن انتقال می‌یابند و یون $O^{2-}$ به‌وجودمی‌آورند. باردیگر به‌سراغ‌عایق شمع اتومبیل شکل۲ـ۷ـ۳ می‌رویم. یونهای $Al^{3+}$ موجود در $Al_2O_3$ الکترونهای ظرفیتی خود، که حامل بار در آلومینیم فلزی‌انـد، را از دست داده‌انـد. این الکترونهـا درحال حاضر توسط یـونهای اکسیژن



**شکل ۸-۶-۱** شکست سطحی. رطوبت و ذرات آلودهٔ جذب شده، موجب ایجاد مسیری درسطح، برای اتصال الکتریکی می‌شوند.

نگه‌داشته‌شده‌اند. دردیگر موادعایق، یونهای $Mg^{2+}$ در MgO الکترون‌خود رابه‌یونهای $O^{2-}$ مـی‌دهند و در چهار وجهی $SiO_4$ سیلیسیم و اکسیژن به‌سرعت الکترون به‌اشتراک می‌گذارند (شکل ۸-۵-۱). درنتیجه ترکیب $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ بعضی از بهترین عایقها را به‌وجود می‌آورد.

ولی موادی که معمولا عایق به‌شمار می‌آیند ممکن است تحت ولتاژهای بسیار بالا این خـاصیت خود را ازدست بـدهند. این پدیده معمولاً سطحی است. مثلا شمع اتومبیل ممکن است به‌دلیل رطوبت صبحگاهی اتصالی کند زیرا رطوبتی کـه روی سطح عایق سرامیکی جمع شده، مـوجب اتصال‌کوتـاه در شکاف شمع مـی‌شود. به‌این دلیل عایقها طویلتر طرح می‌شوند (شکل ۸-۶-۱ را ببینید.) تا امکان اتصال سطحی کم‌شود. همچنین آنها را لعاب می‌دهند تا خاصیت جذب‌کنندگی درآنها از بین برود، زیرا تخلخل داخلی و ترکها فرصتی برای صدمه دیدن بیشتر «سطح» را فراهم می‌آورند. فقط هرگاه گرادیان ولتاژ فوق‌العاده زیاد باشد، فروریزش حجمی ظاهر می‌شود. میدان الکتریکی بسیار قوی برای گسیختن دوقطبیها در عایقها کافی است و هنگامی که شدت میدان از قدرت پیوندها تجاوز کند، تخلیه صورت می گیرد.

خواص دی‌الکتریکی برخی از عـایقهای سرامیکی در جـدول ۸-۶-۱ ذکر شده

**جدول ۸-۶-۱ خواص سرامیکهای دی‌الکتریک**

| ماده | ضریب مقاومت (حجم)، ohm·m | استحکام دی‌الکتریک، volts/mm | ثابت دی‌الکتریک نسبی، K | | ضریب افت، tan δ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | ۶۰ Hz | $۱۰^{۶}$ Hz | ۶۰ Hz | $۱۰^{۶}$ Hz |
| چینی الکتریکی | $۱۰^{۱۱}-۱۰^{۱۳}$ | $۲-۸\times۱۰^{۴}$ | ۶ | — | ۰٫۰۱۰ | — |
| عایقهای استیتایت | $>۱۰^{۱۲}$ | $۸-۱۵\times۱۰^{۴}$ | ۶ | ۶ | ۰٫۰۰۵ | ۰٫۰۰۳ |
| عایقهای زیرکونیم | $\sim۱۰^{۱۳}$ | $۱۰-۱۵\times۱۰^{۴}$ | ۹ | ۸ | ۰٫۰۳۵ | ۰٫۰۰۱ |
| عایقهای آلومین | $>۱۰^{۱۲}$ | $۱۰^{۴}$ | — | ۹ | — | $<۰٫۰۰۰۵$ |
| شیشه سودا ـ آهکی | $۱۰^{۱۲}$ | $۱۰^{۴}$ | ۷ | ۷ | ۰٫۱ | ۰٫۰۱ |
| شیشه-E | $>۱۰^{۱۵}$ | — | — | ۴ | — | ۰٫۰۰۰۶ |
| سیلیس ذوب‌شده $(SiO_۲)$ | $\sim۱۰^{۱۸}$ | $۱۰^{۴}$ | ۴ | ۳٫۸ | ۰٫۰۰۱ | ۰٫۰۰۰۱ |

است. استحکام دی‌الکتریک عبارت از گرادیان ولتاژی است که موجب فروریزش الکتریکی در عایق می‌شود. ثابت دی‌الکتریک نسبی، $\kappa$، را می‌توان با داده‌های مشابهی که برای پلاستیکها در جدول ۷-۶-۱ آمده است، مقایسه کرد. در مجموع این مقادیر در سرامیکها اندکی بیشتر است زیرا به‌جای دوقطبیهای مولکولی یونها تحت تأثیر میدان الکتریکی قرار می‌گیرند. همان‌طور که برای عایقهای پلی‌مری صادق است، ثابت دی‌الکتریک به بسامد حساس است ولی در دماهای عادی، عایقهای سرامیکی تغییر کمتری را نشان می‌دهند. به‌هنگام طرح یک مدار الکتریکی ضریب افت، $\tan\delta$، برای مهندس برق حائز اهمیت است. مقدار انرژی مصرف شده در یک خازن با جریان a.c. عبارت است از حاصلضرب ثابت دی‌الکتریک نسبی در ضریب افت، $\kappa\tan\delta$؛ بنابراین آلومین یا شیشه‌هایی که برای مصارف الکتریکی طراحی می‌شوند (شیشه‌های E) برای استفاده در گستره‌های مگاهرتز انتخاب می‌شوند.*

**نیمرساناهای سرامیکی.** اگرچه ترکیبات سرامیکی اسماً عایق‌اند ولی هرگاه حاوی عناصر واسطهٔ چندظرفیتی باشند، «نیمرسانا» خواهند شد، در شکل ۵-۵-۴ (الف) نشان داده شد که حفره‌های الکترونی با حرکت از یک یون نیکل به‌دیگری بار حمل می‌کنند. ماگنتیت ($Fe_3O_4$ یا $Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4$) نیمرسانای سرامیکی با مقاومت ویژه $10^{-2}$ohm·cm است، که با گرافیت و قلع خاکستری قابل مقایسه است. (شکل ۵-۱-۱) منشأ رسانندگی همان است که در مورد NiO در شکل ۵-۵-۴ (الف) گفته شد، اگرچه نسبت یونهای $Fe^{3+}$ زیادتر است، زیرا تعداد حفره‌های الکترونیی که بار حمل می‌کنند بیشتر است.

مقاومت ویژه را می‌توان به‌وسیلهٔ ایجاد محلولهای جامد افزایش داد. به‌این ترتیب که یونهای دیگری جایگزین یونهای آهن شوند. جدول ۸-۶-۲ این افزایش را برای محلولهای جامد $MgCr_2O_4$ و $FeFe_2O_4$ نشان می‌دهد. هیچکدام از یونهای $Mg^{2+}$ و $Cr^{3+}$ روی الکترونها یا حفره‌های الکترونی اثری ندارند و بنابراین مقاومت ویژه را می‌توان به‌میزان دلخواه تنظیم کرد؛ نکتهٔ قابل‌توجه دیگر از نظر مهندسی ضریب گرمایی مقاومت برای این نیمرساناهاست. مطابق جدول ۸-۶-۲ این تغییر مقاومت بیشتر از ۱٪/°C است و در محلولهای جامد دیگر ممکن است تا ۴٪/°C برسد. این حساسیت برای اندازه‌گیری دقیق دما کافی است و دستگاههایی بنام ترمیستور با استفاده از آن برای اندازه‌گیری دما ساخته شده است. چون ضریب گرمایی مقاومت ویژهٔ ترمیستورها منفی است، می‌توان آنها را در برخی مدارها نیز به‌کار برد تا تغییر مقاومت مثبت اجزای فلزی مدار را جبران کند.

---

* سیلیس ذوب‌شده می‌توانند به‌علت بالا بودن ویسکوزیته بسیار مطلوب باشد ــ بجز آنکه بخاطر ویسکوزیتهٔ بالا، انجام فرایند بر روی آن دشوار است.

**جدول ۸-۶-۲** مقاومت ویژهٔ نیمرساناهای سرامیکی

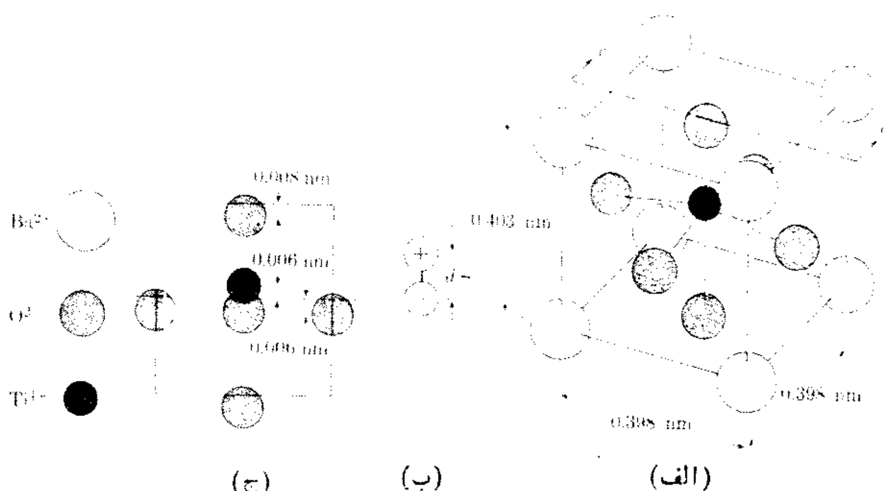
| ترکیب، درصد مول | | مقاومت ویژه، $\Omega . m$ | | $\Delta\rho/\Delta T$ |
|---|---|---|---|---|
| $FeFe_2O_4$ | $MgCr_2O_4$ | ۲۵°C | ۶۰°C | %/°C |
| ۱۰۰ | ۰ | ۰٫۰۰۰۰۰۵ | ۰٫۰۰۰۰۰۴۵ | —۰٫۳ |
| ۷۵ | ۲۵ | ۰٫۰۰۰۷ | ۰٫۰۰۰۴۵ | —۱٫۰ |
| ۵۰ | ۵۰ | ۱٫۸ | ۰٫۷۵ | —۱٫۶ |
| ۲۵ | ۷۵ | ۴۲۰٫۰ | ۱۲۰٫۰ | —۲٫۰ |
| ۰ | ۱۰۰ | $>10^{15}$ | $>10^{10}$ | – |

**سرامیکهای پیزوالکتریك.** بعضی از بلورهـای سرامیکی مرکز تقارن ندارند. در اینجا جنبه‌های بلور شناختی آنها را درنظر نمی‌گیریم ولی وقتی شامل بلورهـای یونی شوند اثر مهم آن را مدنظر قرار می‌دهیم. مـراکز بارهای مثبت ومنفی یکسان نیستند در نتیجه سلول واحد مانند دوقطبی الکتریکی کوچکی، با دوانتهای مثبت و منفی، عمل می‌کند. این مـطلب در $BaTiO_3$ مشهود است. مـطابق شکل ۸-۴-۱ ساختار $BaTiO_3$ در بـالای ۱۲۰°C مکعبی‌است. پایین این دما در نقطه‌ای به‌نام نقطهٔکوری تغییرمکان اندك ولی‌مهمی در یونها اتفاق می‌افتد. یون $Ti^{4+}$ مرکزی‌به‌اندازهٔ ۰٫۰۰۶ nm نسبت به‌یونهای $Ba^{2+}$ تغییر مکان می‌یابد و یونهای $O^{2-}$ در جهت عکس تغییرمکان پیدا می‌کنند، مطابق با شکل ۸-۶-۲.* بدین‌ترتیب مراکز بارهای مثبت و منفی به‌اندازهٔ **طول دوقطبی**، $d$، ازیکدیگر فاصله می‌گیرند.

موادی مثل $BaTiO_3$ هنگامی که در میدان الکتریکی قرار گیرند ابعادشان تغییر می‌کند زیرا بارهـای منفی به‌طرف الکترود مثبت و بارهـای مثبت به‌سمت الکترود منفی کشیده می‌شوند و طـول دو قطبی، $d$، افزایش می‌یابد. این امر همچنین مـوجب افزایش گشتاور دو قطبی $Qd$ و قطبش $\mathcal{P}$ ، مـی‌شود زیـرا قطبش مجموع گشتاورهـای دوقطبی، $\Sigma Qd$، در واحد حجم، $V$، است (رابطهٔ ۷-۶-۱).

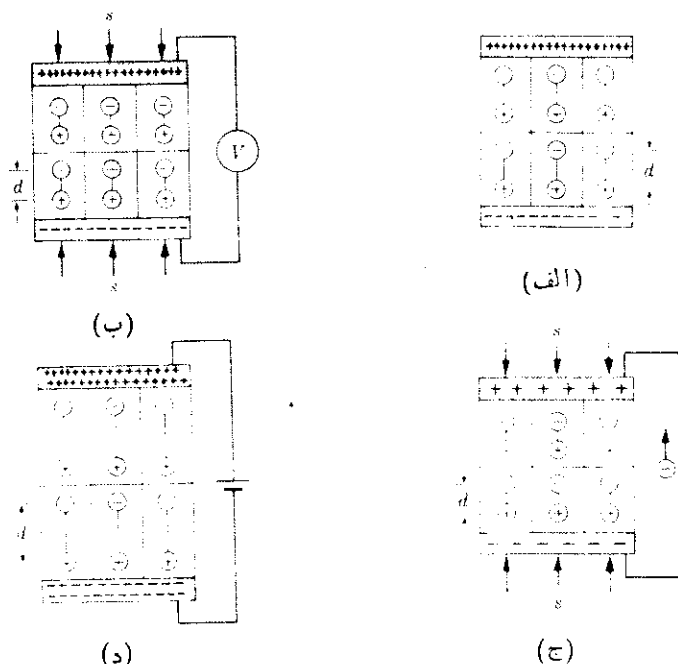
اثرات بالا وسیله‌ای بـرای تبدیل انرژی مـکانیکی به‌انرژی الکتریکی و برعکس

* شکل ۸-۶-۲ تغییرمکان یون $Ti^{4+}$ به‌طرف بالا را نشان می‌دهد. این تغییرمکان درهریك از شش‌جهت مختصات‌می‌تواند صورت گیرد و در هرصورت‌حرکت یونهای $O^{2-}$ درجهت‌مخالف خواهد بود.




**شکل ۸ـ۶ـ۲** ساختار چهاروجهی $BaTiO_3$. بالای $120°C$ ($250 °F$) ساختار $BaTiO_3$ مکعبی است (۸ـ۴ـ۱) وپایین این دما یونها نسبت به یونهای گوشهٔ $Ba^{2+}$ تغییرمکان می‌یابند. چون یونهای $Ti^{4+}$ و $O^{2-}$ درجهت عکس تغییرمکان می‌یابند مراکز بارهای مثبت و منفی جدا خواهند بود و سلول واحد، غیرمکعبی می‌شود.

است. برای درك این مطلب به‌شکل ۸ـ۶ـ۳ (الف) مراجعه کنید. منظم قرار گرفتن دوقطبیها در بسیاری از سلولهای واحد موجب قطبش می‌شود. به‌طوری که بارهای مثبت در یك طرف بلور و بارهای منفی درطرف دیگر آن جمع می‌شوند. اکنون دو موردی را که شکلهای ۸ـ۶ـ۳ (ب) و ۸ـ۶ـ۳ (د) نشان می‌دهند، در نظر بگیرید. (۱) بلور را با تنش $s$ فشار دهید (یا بکشید) کرنش $e$ به‌وجود می‌آید که به‌وسیلهٔ مدول کشسانی قابل تعیین است. این کرنش طول دو قطبی $d$ را تغییر می‌دهد و مستقیماً روی قطبش اثر می‌گذارد ($=\Sigma Qd/V$)، زیرا $Q$ و $V$ اساساً ثابت باقی می‌مانند. با قطبش کمتر (درمورد اعمال فشار) دردو طرف بلور چگالی بار افزایش می‌یابد. اگر دوانتهای آن جدا ازهم باشند، اختلاف پتانسیلی به‌وجودمی‌آید [شکل ۸ـ۶ـ۳ (ب)]. اگر اتصال الکتریکی وجود داشته باشد الکترونها ازیك انتها به‌طرف دیگرجریان می‌یابند. (۲) درشکل ۸ـ۶ـ۳(د) فشاری اعمال نشده، به‌جای آن ولتاژی اعمال شده است که چگالی بار را در دو انتها افزایش می‌دهد. بارهای منفی درون $BaTiO_3$ به‌یك طرف کشیده می‌شوند و بارهای مثبت به‌سمت مخالف، بنابراین نه‌تنها طول دوقطبی $d$ را تغییر می‌دهند، بلکه ابعاد بلور را نیزعوض می‌کنند. این دو وضعیت نشان می‌دهند که چگونه نیروهای مکانیکی و ابعاد با بارهای الکتریکی و یا ولتاژ تغییر می‌کند. ادواتی که چنین کاراییهایی دارند ترانسدیوسر نامیده می‌شوند. موادی باخصوصیات فوق را پیزوالکتریك یعنی فشار ـ الکتریك می‌نامند. بلورهای




**شکل ۸ــ۶ــ۳** مادهٔ پیزوالکتریك. میدان الکتریکی ایجادکننده تغییر بعد درقسمت (د) نشان داده شده است برعکس، کرنش حاصل از فشار موجب تغییر در ولتاژ می‌شود (ب).

نوع $BaTiO_3$* برای سنجه‌های فشار، صفحه‌های گرامافون و مولدهای صدا بـا بسامد بالا به‌کار می‌روند. مثلا کارتریج گرامافون‌سرامیکی را درنظر می‌گیریم. سوزن گرامافون شیار روی صفحه را طی می‌کند. ترانسدیوسر کوچکی باسوزن در تماس است ونوسانات به‌وجود آمده درشیار را نشان‌می‌دهد. هم‌بسامد وهم دامنه را می‌توان به‌وسیلهٔ تغییر ولتاژ احساس کرد [شکل ۸ــ۶ــ۳ (ب)]. اگرچـه سیگنال ولتاژ کوچك است، آن را می‌توان توسط مدار الکترونیکی تقویت‌کرد تا بتواند با بلندگو شنیده شود.

بلورهـای کوارتز ($SiO_2$) نیز پیزوالکتریکی‌انـد و برای مصارف ویژه‌ای در مدارهایی که کنترل بسامد لازم است به‌کار می‌روند (شکل ۸ــ۶ــ۴). هنگامی کـه چنین بلوری به‌یك شکل خـاص هندسی برش داده شود بسامد ارتعاشات کشسان ثابتی خواهد

---

* سرامیکهای‌پیزوالکتریکی‌که‌معمولا به‌کار می‌روند، محلولهای جامد $PbZrO_3$ــ$PbTiO_3$ هستند که PZT نامیده می‌شوند. ساختار آنهاهمان ساختار $BaTiO_3$ درشکل ۸ــ۶ــ۲ است. ولی نقطهٔ کوری آنها بیشتراز $BaTiO_3$ و گسترهٔ کاربرد آنها در طراحی وسیعتر است.



**شکل ۸-۶-۴** بلورهای پیزوالکتریك (کوارتز). این بلورهـا به‌طور مصنوعی ساخته شده‌اند و به‌عنوان تشدیدکننده برای کنترل بسامد به‌کار مـی‌روند. به‌هنگام ارتعاش کشسان‌کوارتز، میدان الکتریکی متقابلا و باهمان بسامد پاسخ خواهد داد و بر عکس.

داشت، تغییراتش یـك در ۱۰^۸ است! بنابراین در حـالت تشدید، چنین بلوری می‌تواند بسامد مدار الکترونیکی را باهمان دقت کنترل کند. مدارهای ظریف ساعت و مدارهـای کنترل امواج‌رادیو، دوموردی‌اند که‌در آنها بلورهای کوارتز به‌عنوان موادپیزوالکتریکی به‌کار می‌روند.

☐ **سرامیکهای مغناطیسی.** آهنرباهای فلزی‌در مدارهای UHF و VHF زیان آورند. بسامدهای بالا، جریانی را القا می‌کنند و بنابراین موجب اتلاف توان در هسته‌های فلزی می‌شوند. درحقیقت‌ازاین‌القاکنندگی‌درمتالورژی برای‌ذوب کردن آلیاژهای مرغوب‌استفاده می‌شود. این اتلاف توان به‌صورت گرما ممکن است به‌مدار الکترونیکی صدمه‌واردکند.*

---

* این مشکل مدارهـای 60-Hz را مـی‌توان بـا به‌کاربردن اجسام لایه لایه به‌جای هستهٔ یکپارچه در مبدلها، آرمیچرهـا و ...، رفع‌کرد و دراین صورت مقاومت مؤثر زیـاد می‌شود. به‌علاوه در مدارهای بسامد بالا، این لایه‌ها باید بسیار نازك باشند.

خوشبختانه ترکیبات سرامیکی می‌توانند هم مغناطیسی و هم نارسانا باشند.

اگر یک اتم آهن را درنظر بگیریم (رابطهٔ ۲ـ۱ـ۱) مشاهده می‌کنیم که هر اتم آهن شش الکترون $3d$ دارد. این برای یون فرو ($Fe^{2+}$) نیز صادق است. (رابطهٔ ۲ـ۱ـ۲) ولی هر یون فریک ($Fe^{3+}$) پنج الکترون $3d$ دارد (رابطهٔ ۲ـ۱ـ۳). اسپین این الکترونها در پنج اربیتال $3d$ به‌این ترتیب است

$$Fe^{2+}: \underline{\uparrow\downarrow} \quad \underline{\uparrow} \quad \underline{\uparrow} \quad \underline{\uparrow} \quad \underline{\uparrow} \qquad (۸ـ۶ـ۱)$$

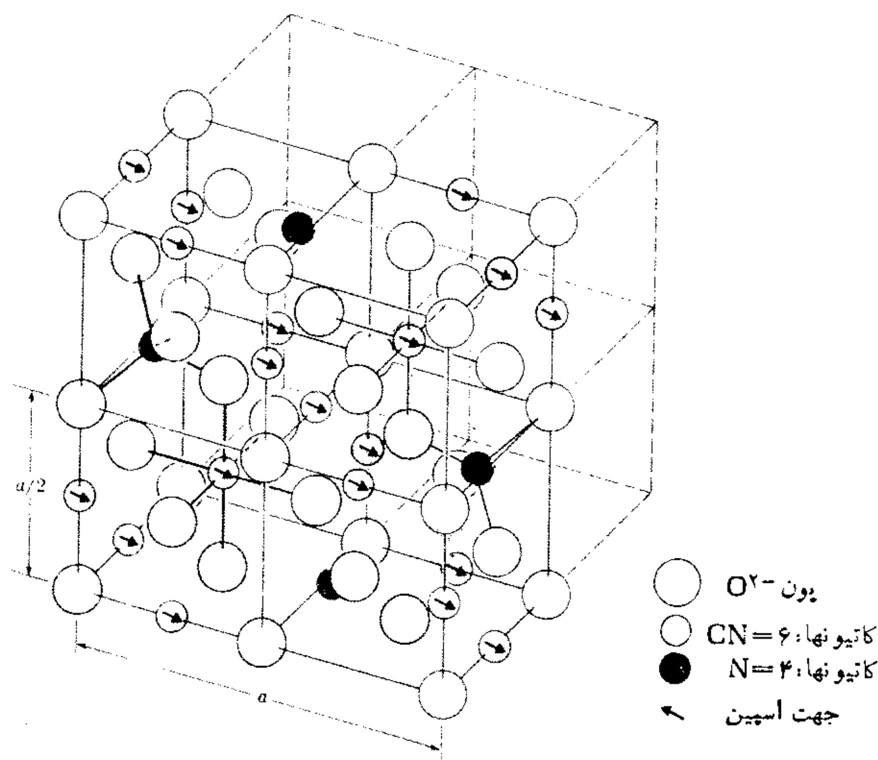
$$Fe^{3+}: \underline{\uparrow} \quad \underline{\uparrow} \quad \underline{\uparrow} \quad \underline{\uparrow} \quad \underline{\uparrow} \qquad (۸ـ۶ـ۲)$$

و این بدان معنی است که در هر $Fe^{2+}$، به‌دلیل وجود چهار اسپین الکترون جفت نشده، بی‌توازنی مغناطیس وجود دارد (به‌نام چهار مگنتون بوهر خوانده می‌شود) چون گشتاور مغناطیسی هر اسپین الکترون برابر $۹٫۲۷ \times 10^{-24} amp \cdot m^2$ است، کل گشتاور مغناطیسی هر یون $Fe^{2+}$ برابر $۳۷ \times 10^{-24} amp \cdot m^2$ خواهد بود. هر یون $Fe^{3+}$ دارای بی‌توازنیی برابر پنج مگنتون بوهر و گشتاور مغناطیسی برابر $۴۶٫۳ \times 10^{-24} amp \cdot m^2$ است.

بسیاری از فازهای سرامیکی از گروه $A_mB_nX_p$ بخش ۸ـ۴ هستند مانند $Ni_8Fe_{16}O_{32}$ (ماگنتیت $Fe_3O_4$ یا $Fe_8^{2+}Fe_{16}^{3+}O_{32}$)، سلول واحد آنها در شکل ۸ـ۶ـ۵ دیده می‌شود. ساختار آن پیچیده است ولی با توجه به‌اینکه یونهای $O^{2-}$ آرایش fcc دارند، ساده می‌شود. در مقایسه با آنچه که در شکلهای ۳ـ۱ـ۱ و ۸ـ۲ـ۲ نشان دادیم، ابعاد این سلول واحد دو برابر است. درنتیجه در هر سلول واحد $[Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4]_8$، ۳۲ یون اکسیژن، ۱۶ یون فریک، ۸ یون فرو وجود دارد. کاتیونهای آهن در مکانهای بین‌نشینی ۴ گانه و ۶ گانه قرار می‌گیرند (شکل ۸ـ۲ـ۲). تمام آنهایی که در مکانهای 4-f قرار دارند ($CN = ۴$) دارای گشتاور مغناطیسی در یکی از جهات $\langle ۱۱۱ \rangle$ و آنهایی که در مکانهای 6-f قرار دارند، دارای گشتاور مغناطیسی درجهت مخالف $\langle ۱۱۱ \rangle$ هستند. بررسی بیشتر نشان می‌دهد که ۱۶ یون $Fe^{3+}$ در هر سلول واحد در مکانهای 4-f و 6-f به‌تساوی قرار گرفته‌اند. بنابراین گشتاور مغناطیسی خالص یونهای $Fe^{3+}$ صفر است

$$۰ = (۵\downarrow \text{در هر یون})(۸ \text{ یون } Fe^{3+}) + (۵\uparrow \text{در هر یون})(۸ \text{ یون } Fe^{3+})$$
(۸ـ۶ـ۳)

ولی تقریباً تمام یونهای $Fe^{2+}$ در مکانهای 6-f قرار می‌گیرند و چون هر یون از ۸ $Fe^{2+}$ چهار مگنتون بوهر، $\beta$، دارد هر کدام برابر با $۹٫۲۷ \times 10^{-24} amp \cdot m^2$، گشتاور مغناطیسی هر سلول واحد برابر $۳۲\beta$ یا تقریباً $۰٫۳ \times 10^{-21} amp \cdot m^2$ است. از آنجا که ثابت شبکهٔ سلول واحد $۰٫۸۳۷ nm$ و اشباع مغناطیسی $M_s$ برابر است با بیشینهٔ گشتاور مغناطیسی در واحد حجم، می‌توان اشباع مغناطیسی $Fe_3O_4$ را به‌صورت زیر محاسبه کرد




**شکل ۸ـ۶ـ۵** ساختار فرواسپینل. یونهای $O^{2-}$ آرایهٔ fcc تشکیل می‌دهند و کاتیونها در محلهای بین‌نشینی نشان داده شده، قرار می‌گیرند (فقط نیمهٔ روبرویی سلول واحد رسم شده است.) ابعاد سلول دو برابر ساختارهای AX است (شکل ۸ـ۲ـ۲). گشتاور مغناطیسی این کاتیونها در مکانهای 6-f و 4-f ترتیب خلاف یکدیگر دارند. از آنجا که گشتاور مغناطیسی درجهت اسپین برابر نیست، هرسلول واحد گشتاور مغناطیسی خالصی دارد.

$$M_s = \frac{0.3 \times 10^{-21}\,\text{amp} \cdot \text{m}^2}{(0.837 \times 10^{-9}\,\text{m})^3} = 0.5 \times 10^6\,\text{amp/m}$$

و این بامقدار تجربی‌آن یعنی $0.53 + 10^6\,\text{amp/m}$ برابراست.

□ **آهنرباهای نرم و سخت.** به‌محض آنکه میدان مغناطیسی برداشته شود، بیشترخاصیت مغناطیسی $Fe_3O_4$ ازبین می‌رود. این از بین رفتن به‌علت آن است که آرایش مغناطیسی یکایك اتمها باقی نمی‌ماند. از این‌نوع رفتار «مواد نرم» در ترانسفورماتور یا در یوغ

مغناطیسی لامپ تصویر تلویزیون استفاده می‌شود، زیــرا به‌جریان متناوبی حدود ۶۰ Hz در خطوط انتقال نیرو، یا در گسترهٔ MHz برای تلویزیون پاسخ می‌دهد.

در آهنربای «سخت» یا دائمی پس‌از برداشتن میدان مغناطیسی خاصیت مغناطیسی باقی‌می‌ماند. در موقعیتهای بسیاری این خاصیت مطلوب است. ازاین خاصیت نه‌تنها برای آهنرباهای دائمی کوچك معمولی که درخانه و مغازه‌هـا به‌کار می‌روند استفاده مـی‌شود، بلکه قسمتهایی از میلیونها مــوتورالکتریکی، پرکننده‌های مغناطیسی که در درزبندهای در یخچالها استفاده‌می‌شود وپوشش نوارهای‌ضبط‌صوت وکاستهای‌ویدئو را نیز شامل‌می‌شود.

برای‌درك تفاوت بین آهنرباهای «نرم» و «سخت» اول بایدمفهوم حوزه را دریافت. حوزه قسمتی از بلور است که درآن تمام گشتاورهای مغناطیسی متفقاً ردیف شده‌اند. یعنی این حجم کوچك داخل دانه، آهنربای کوچکی با جهتگیری مغناطیسی مخصوص به‌خــود است. حوزه‌هایی که‌به‌طور مطلوب جهتگیری کرده‌اند هنگامی‌که درمیدان مغناطیسی قرار گیرند رشد می‌کنند و سایرین منقبض مـی‌شوند. رشد به‌وسیلهٔ حرکت دیواره‌هــای حوزه صورت می‌گیرد. در آهنربای «نرم» پس‌از برداشتن‌میدان، دیواره برمی‌گردد وجهتگیری مغناطیسی به‌هم می‌خورد وخاصیت مغناطیسی خالصی باقی‌نمی‌ماند. در آهنربای «سخت» لازم است میدان‌مغناطیسی معکوسی اعمال شود تــا حوزه‌هایی بــا جهت مخالف به‌وجود آیند.* همان‌طور کــه گفته شد، هرنوع تغییری در جهتگیری، ازحرکت دیواره‌هــای بین حوزه‌های مجاور حاصل می‌شود.

خصوصیات ساختاری، مقدار میدان معکوسی، که برای حرکت دیواره‌هــای حوزه لازم است، را معین می‌کند. این دیواره‌ها نمی‌توانند از مرزدانه‌ها عبور کنند. نابجاییها و سایر عیوب بلوری جلوی حرکت آنها را می‌گیرند. بنابراین فولاد کرنش سختی شده نیز ازنظر مغناطیسی‌فولاد «سخت»، یعنی آهنربای دائمی است، مگرآنکه در معرض میدان وادارندهٔ قویی، $H_c$، قرار گیرد. آهنربای آلنیکو میکروساختار «دوفازی» بسیار ریزی دارد. دیواره‌های حوزه نمی‌توانند از مرز «فازها» عبور کنند؛ بنابراین آهنربای آلنیکو دائمی‌است. آهنربایی‌که حاوی ذرات فوق‌العاده ریزآهن است دائمی‌است، زیرا هرذره کوچك حوزهٔ مجزایی به‌حساب می‌آید؛ بنابراین میدان‌معکوس باید به‌حدی قوی باشدکه به‌جای‌اینکه‌فقط مرزها را حرکت دهد، حوزه‌های‌جدیدی نیز در داخل‌ذره به‌وجودآورد.

**مثال ۸-۶-۱** برای ایجاد یك لایهٔ شیشه سیلیسی ($SiO_2$) روی سطح، سیلیسیم به‌اندازهٔ ۲۵ µm اکسید شده‌است و سپس با آلومینیم پوشش داده شده‌است. در بسامد $10^6$ هرتز، ظرفیت این لایه را با لایه‌ای از پلی‌اتیلن (PE) به‌ضخامت 2-mil (۵۰ µm) کــه با

---

*نیروی وادارنده $H_c$، مقدار میدان معکوسی است کــه برای برگرداندن مغناطیس خــالص به‌صفر، لازم است.

آلومینیم پوشش- بخار داده شده است مقایسه کنید.

حل: با استفاده از رابطهٔ (۱-۴-۷) و داده‌های جدولهای ۷-۶-۱ و ۸-۶-۱

$$\frac{C_{PE}}{C_{SiO_۲}}=\frac{۲/۳(۸/۸۵\times ۱۰^{-۱۲} C/V\cdot m)A/(۵۰\times ۱۰^{-۶}\,m)}{۳/۸(۸/۸۵\times ۱۰^{-۱۲} C/V\cdot m)A/(۲۵\times ۱۰^{-۶}\,m)}$$

$$=۰/۳$$ ▲

**مثال ۸-۶-۲** در اکسید نیکل [شکل ۵-۵-۴ (الف)] معمولا تعداد یونهای $Ni^{۳+}$ محدود است ($Ni^{۳+}/Ni^{۲+}<۱۰^{-۴}$). وقتی $Li_۲O$ به NiO اضافه می‌شود، یونهای $Ni^{۲+}$ بیشتری اکسید و به $Ni^{۳+}$ تبدیل می‌شوند وجفت $Li^+Ni^{۳+}$ جانشین دو یون قبلی $Ni^{۲+}$ می‌شود. وقتی مقدار $LiO_۲$ به ۱ درصد برسد چه‌مقدارحامل بار در هر $m^۳$ وجود دارد (NiO همان ساختار NaCl را دارد).

حل: ۱۰۰ amu را به‌عنوان مبنا به‌کار برید.

$$Li_۲O \quad \frac{۱\ amu}{۱۳/۸۸+۱۶}=۰/۰۳۳۵ \ (\text{یا}\ ۰/۰۶۷\,Li^+)$$

$$NiO \quad \frac{۹۹\ amu}{۵۸/۷۱+۱۶}=۱/۳۲۵۱$$

$$\frac{\text{یونهای اکسیژن}}{۱۰۰\,amu}=۱/۳۶$$

با ساختار نوع NaCl، NiO درهرسلول واحد چهار یون اکسیژن دارد. بنابراین

$$\frac{\text{سلولهای واحد}}{۱۰۰\,amu}=\frac{۱/۳۶}{۴}=۰/۳۴$$

ازآنجاکه درهر ۱۰۰amu، $Li^+$ ۰/۰۶۷ وجود دارد، $Ni^{۳+}$ ۰/۰۶۷ وجود خواهد داشت، و بنابراین در هر ۱۰۰amu، ۰/۰۶۷ حامل نوع p وجود دارد

$$\frac{۰/۰۶۷\ \text{حامل}/۱۰۰\,amu}{۰/۳۴\ \text{سلول واحد}/۱۰۰\,amu}=\frac{۰/۱۹۷\ \text{حامل}}{\text{سلول واحد}}$$

و چون $r=\sim۰/۰۶۹\ nm$

$$\frac{۰/۱۹۷\ \text{حامل}}{[۲(۰/۰۶۹+۰/۱۴۰)۱۰^{-۹}\,m]^۳}=۲/۷\times ۱۰^{۲۷}/m^۳$$

توضیح. می‌توان رسانندگی NiO را به‌صورت پرش یك‌الکترون ازیك‌یون نیکل

به دیگری تجسم کرد. بنابراین بـا حرکت یك حفره‌الکترونی از $Ni^{3+}$ به $Ni^{2+}$، اتم دومی به‌صورت $Ni^{3+}$ و اولی به‌صورت $Ni^{2+}$ درمی‌آید. ▲

**مثال ۸-۶-۳** قطبش، $\mathcal{P}$، $BaTiO_3$ را براساس شکل ۸-۶-۲ و اطلاعـات بخش ۷-۶ محاسبه کنید.

حل: درصورتی که مرکز سلول در گوشه‌های یونهای $Ba^{2+}$ قرار داشته باشد

| یون | | $Q$،coul | $d$،m | $Qd$،coul . m |
|---|---|---|---|---|
| $Ba^{2+}$ | | $+2(0/16\times10^{-18})$ | ۰ | ۰ |
| $Ti^{4+}$ | | $+4(0/16\times10^{-18})$ | $+0/06(10^{-10})$ | $3/84\times10^{-30}$ |
| $2O^{2-}$ | (دیواره‌های جانبی سلول) | $-4(0/16\times10^{-18})$ | $-0/06(10^{-10})$ | $3/84\times10^{-30}$ |
| $O^{2-}$ | (بالاوپایین) | $-2(0/16\times10^{-18})$ | $-0/08(10^{-10})$ | $2/56\times10^{-30}$ |
| | | | | $\sum=10/24\times10^{-30}$ |

از رابطهٔ (۷-۶-۱)

$$\mathcal{P}=\frac{\Sigma Qd}{V}$$

$$=\frac{10/24\times10^{-30}\,C\cdot m}{4/03\times3/98^2\times10^{-30}\,m^3}$$

$$=0/16\,coul/m^2$$

توضیح. این بدان‌معنی است که $BaTiO_3$ قطبی شده می‌تواند چگالی باری برابر $0/16\,coul/m^2$، معادل $10^{12}$ الکترون $/mm^2$ داشته باشد. ▲

☐ **مثال ۸-۶-۴** هرگاه ($2\,Li^{+}+2\,Fe^{3+}$) به‌جای $8Fe^{2+}$ قرار گیرد، ماگنتیت ازالف) $Fe_8^{2+}Fe_{16}^{3+}O_{32}$ به ب) $Li_4^{+}Fe_{20}^{3+}O_{32}$ تبدیل می‌شود. بافرض اینکـه تغییرابعاد سلول واحدقابل‌اغماض باشد ویونهای $Li^{+}$ به‌تساوی درمکانهای f-۴ و f-۶ وارد شوند، اشباع مغناطیسی چند درصد تغییر کرده است؟

حل: ساختار فرواسپینل دارای ۱۶ کاتیون درمکانهای f-۶ و ۸ کاتیون در مکانهای

f-۴ است. ($O^{2-}$ و $Li^{+}$ غیرمغناطیسی‌اند، هریون $Fe^{2+}$ دارای $4\beta$ و هر $Fe^{3+}$ دارای $5\beta$ در هریون است.)

| | f↑-۶ | f↓-۴ | آرایهٔ fcc |
|---|---|---|---|
| Mag : | $8\,Fe^{3+} + 8Fe^{2+}$ | $8\,Fe^{3+}$ | $32\,O^{2-}$ |
| LiMag : | $12\,Fe^{3+} + 2Li^{+}$ | $6\,Fe^{3+} + 2\,Li^{+}$ | $32O^{2-}$ |

$$\beta_{Mag} = (8)(5\uparrow) + (8)(4\uparrow) + (8)(5\downarrow) = \frac{32\,\beta}{\text{سلول واحد}}$$

$$\beta_{LiMag} = (12)(5\uparrow) \qquad + (6)(5\downarrow) = \frac{40\,\beta}{\text{سلول واحد}}$$

اگر حجم سلول واحد $V$ باشد

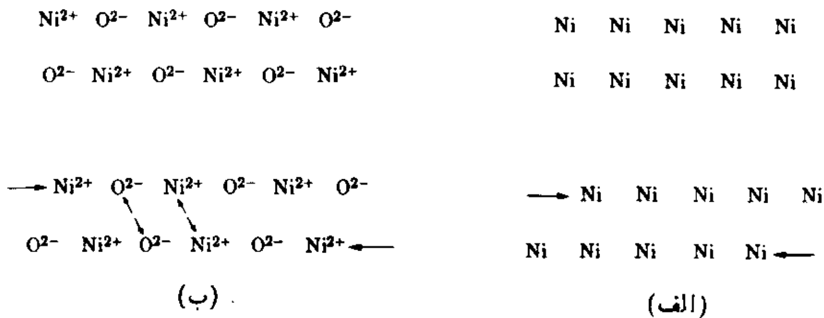
$$\Delta M_s = \frac{(40 - 32)(9{,}27 \times 10^{-24})/V}{32(9{,}27 \times 10^{-24})/V} = +\%25$$

## ۸-۷ رفتار مکانیکی سرامیکها

موادسرامیکی، به‌استثنای چندمورد ازقبیل خاک‌رس خمیری، استحکام برشی زیادی دارند، بنابراین انعطاف‌پذیر نیستند. خواهیم دیدکه این‌امر موجب بالابودن استحکام فشاری و سختی زیادی می‌شود. به‌علاوه حساسیت به‌شکاف زیاد و استحکام شکست آنها کم است.

ترکیبات دارای اتمها یا یونهای مختلفی باآرایش منظم‌اند. این موضوع در بخش ۶-۴ که مطالعهٔ آن اختیاری بود، برای ترکیبات بین فلزی شرح داده شد. در فازهای سرامیکی‌نیز کاتیونها با آنیونها و آنیونها هم با کاتیونها، کوئوردینانس شده‌اند (بخش ۸-۲). البته این طبیعی است زیرا یونهای ناهمانند یکدیگر را جذب و یونهای همانند یکدیگر را دفع می‌کنند. ولی این حالت مطابق با شکل ۸-۷-۱، مانع لغزش می‌شود. فرایند لغزش برای NiO، MgO، و بلورهای دیگر نوع NaCl (همان‌طورکه رسم شده است) درجهت افقی صورت می‌گیرد. تغییرآرایش هنگامی انجام می‌شود که ابتدا پیوندهای‌قوی مثبت ومنفی بین‌یونهای $Ni^{2+}$ و $O^{2-}$ شکسته‌شوند، سپس‌همین‌که‌یون $Ni^{2+}$ حرکت‌کند و به‌یون $O^{2-}$ بعدی متصل شود، بارهای مثبت باید عبور کنند و چنین موردی در فلزات وجود ندارد.

در NiO محدودیت فوق وجود ندارد و لغزش ممکن است در بعضی از جهتهای دیگر مانند جهت °۴۵ رخ دهد. این لغزش درجهت ⟨۱۱۰⟩، روی صفحهٔ {۱۱۰} خواهد بود، ولی دراین‌حالت شش سیستم لغزش‌امکانپذیر است. این‌حالت با دوازده سیستم‌لغزش




**شکل ۸-۷-۱** مقایسهٔ فرایندهای لغزش (درفلز نیکل و اکسید نیکل). تغییر مکان یونها در NiO نسبت به‌اتمهای Ni نیروی بیشتری لازم دارد. نیروهای دافعهٔ قوی بین یونهای همانند اهمیت پیدا می‌کنند. نیکل بیش‌از اکسید نیکل سیستم لغزش دارد.

نیکل fcc در ⟨۱۱۰⟩ {۱۱۱} قابل‌مقایسه است (جدول ۶-۴-۱). به‌علاوه بردار لغزش b در NiO برابر $(r+R)\sqrt{2}$، یعنی ۳۰ر۰ nm و بزرگتر از ۲۵ر۰ nm درنیکل است. به‌این ترتیب عواملی چون (۱) دافعهٔ کولنی، (۲) تعداد اندك سیستمهای لغزش، و (۳) فاصلهٔ تغییرمکان طولانی‌تر* موجب می‌شوندکه مقاومت در برابر تغییرشکل پلاستیکی در سرامیکهای بلوری نسبت به‌فلزات سازندهٔ آنها بسیار بیشترباشد. درمورد فازهای سرامیکی پیچیده‌تر مانند سیلیکاتها و اسپینل (شکل ۸-۶-۵) یا سیمان پرتلند**، این مقاومت بازهم بیشتر خواهد بود.

سختی. فازهای سرامیکی چون لغزش پلاستیکی انجام نمی‌دهند غالباً سخت‌اند. درنتیجه مواد ساینده مانند سنباده، حاوی $Al_2O_3$ است (معمولا مقداری $Fe_2O_3$ و یا $TiO_2$ نیز به‌صورت محلول جامد درآن وجود دارد). سیلیسیم کاربید (SiC) و TiC نیز در سنگ‌زدن و بریدن فلزات، و فرایندهای تولید مشابه به‌کار می‌روند. یکی‌از شکلهای SiC ساختاری از نوع «ZnS» (شکل ۸-۲-۴) دارد. ساختارTiC از نوع «NaCl» (شکل ۸-۲-۳) است.

موارد استثنایی که در سختی سرامیکها دیده می‌شود می‌تواند مستقیماً به ساختار آنها مربوط باشد. مثلا نرم بودن تالك، خاك‌رس، و میکا به دلیل ساختار ورقه‌ای آنهاست. زیرا اتمها در هر ورق محکم‌اند ولی پیوند بین ورقها، فرعی و ضعیف است (بخش ۲-۴).

---

* انرژی لازم برای حرکت نابجاییها بامربع b متناسب است (رابطهٔ ۶-۴-۲).

** بعضی از شیمیدانها فاز هیدراتهٔ سیمان پرتلند را به‌صورت زیر درنظر می‌گیرند



$$Ca_2[SiO_2(OH)_2]_2 \cdot (CaO)_{y-1} \cdot xH_2O!!$$

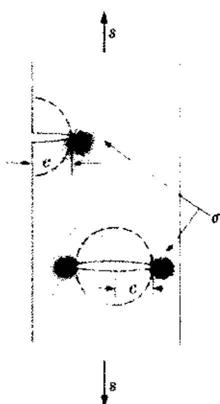
**حساسیت به‌شکاف.** شکاف یا ترك تنش‌افزاست. اثر آن به‌مراتب بیشتر از اثری است که براساس کم‌شدن سطح مقطع پیش‌بینی می‌شود، تنش حقیقی، $\sigma$، در نوك شکاف یا درز (شکل ۸-۷-۲) به‌تنش کششی اسمی، $s$، عمق ترك، $c$، و شعاع انحنا، $r$، بستگی دارد

$$\sigma = s ۲\sqrt{\frac{c}{r}} \qquad (۸\text{-}۷\text{-}۱)$$

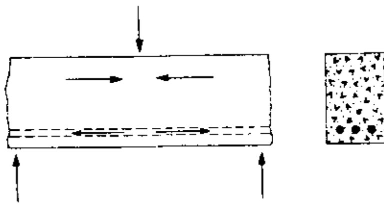
اگر در مادهٔ انعطاف‌پذیری، $\sigma_c$ از استحکام تسلیم تجاوزکند، شعاع نوك شکاف آن بیشتر می‌شود و بدین‌ترتیب، تمرکز تنش کاهش می‌یابد. ترك در مادهٔ انعطاف‌ناپذیر می‌تواند ابعاد اتمی (مثلا ۰٫۱ nm) داشته باشد. در این‌صورت هنگامی که اندازهٔ ترك روی سطح به ۰٫۱ تا ۱۰ $\mu$m ($۱۰^{-۴}$ تا $۱۰^{-۲}$ میلی‌متر) می‌رسد، ضریب تمرکز تنش، $\sigma/s$، $۱۰^۲$ یا $۱۰^۳$ می‌شود. ترکهای عمیقتر مهمترند. با آنکه سرامیکها در برش محکم‌اند، تمرکز تنش $\sigma$ ممکن است از استحکام پیوند بین اتمها بیشتر شود و ترك شروع به‌پیشروی کند. این پیشروی عمق ترك؛ $c$، را افزایش می‌دهد و تمرکز تنش موجود در رابطهٔ (۸-۷-۱) را بازهم بیشتر می‌کند تا سرانجام شکست فاجعه‌آمیز رخ می‌دهد.

مواد سرامیکی (و ترکیبات بین‌فلزی بخش ۶-۴) به‌علت مقاومت آنها در برابر برش درنوك ترکها، در کشش ضعیف‌اند. ازطرفی همین عامل یعنی استحکام برشی، آنها را درمقابل فشار قوی‌می‌کند. میکرو ترك می‌تواند نیروی فشاری را تحمل‌کند بدون‌آنکه وسعت یابد.

**استفاده از مواد انعطاف‌ناپذیر.** رابطهٔ استحکام فشاری زیاد و استحکام‌کششی کم در سرامیکها برای مهندس طراح بسیار مهم است. بتن، آجر و سایر سرامیکها در درجهٔ اول در محلهای تحت فشار به‌کار می‌روند (شکل ۸-۷-۳). هرجا لازم باشد که چنین موادی مانند شیشه، تحت خمش (و در نتیجه بار کششی) قرار گیرند، معمولا لازم است که ابعاد




**شکل ۸-۷-۲** تمرکز تنش ضریب تمرکزتنش به عمق ترك وشعاع‌انحنای نوك‌آن‌بستگی‌دارد. (رابطهٔ ۸-۷-۱) این مثال برای صفحهٔ تخت است.



**شکل ۸-۷-۳** بتن مسلح. دراین تیربتنی، از مادهٔ انعطاف‌پذیر در محلهای تحت فشار استفاده شده است.

آنها را افــزایش دهیم. مثلا شیشهٔ لامپ‌تصویر تلویزیون باید حدود ۱۵ میلی‌متر ضخامت داشته باشد.

چون مواد سرامیکی، تحت فشار قویترند تا تحت‌کشش، برای مصارفی مانند پنجرهٔ عقب اتومبیل و شیشه‌های در، کــه در آنها استحکام زیادی لازم است، شیشهٔ بازپخت شده به‌کار می‌رود. برای تولید شیشهٔ بازپخت‌شده، شیشه‌را تا دمایی‌که در آن تنشهای موجود بین اتمها ازبین برود، گرم می‌کنند و سپس به‌وسیلهٔ جریـان هوا یـا روغن سریعاً آن‌را سرد می‌کنند (شکل ۸-۷-۴). به‌دلیل‌کاهش دما، سطح شیشه منقبض و صلب مـی‌شود، درحالی که مرکز شیشه هنوز گرم است و می‌تواند ابعاد خود را با انقباض سطح وفق دهد. وقتی که مرکز شیشه سرد و اندکی منقبض شد، روی سطح آن تنشهای فشاری (در مـرکز آن تنشهای کششی) پدیدمی‌آید. شکل ۸-۷-۵ مقطع چنین‌شیشه‌ای را همراه‌باتنشهای موجود نشان‌می‌دهد. به‌این‌ترتیب بار زیادی‌باید اعمال‌شود تا درسطح شیشه تنشهای کششی ایجاد شود و ترك به‌وجـود آید.* در واقع از آنجاکــه چنین‌باری ابتدا باید بر تنشهای فشاری فایق آید، در مجموع، استحکام شیشه تاحد زیادی افزایش یافته است.

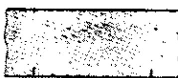
**مثال ۸-۷-۱** الف) شش‌سیستم‌لغزش {۱۱۰}⟨۱$\bar{۱}$۰⟩ را در MnS (که ساختار NaCl دارد) مشخص کنید؛ ☐ ب) طول بردار لغزش دراین‌سیستمهای لغزش چقدر است؟



مرکز سرد و منقبض می‌شود. سطح تحت‌فشار ومرکز تحت‌کشش است



سطح سریعاً سرد و منقبض می‌شود و مرکز خود را وفق می‌دهد در نتیجه تنشهای جزئی‌وجود دارند

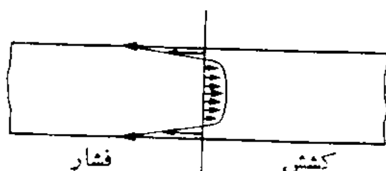


شیشهٔ داغ بدون تنش

**شکل ۸-۷-۴** تغییر ابعاد در شیشهٔ «بازپخت شده».

---

* اگر ترك از پوستهٔ تحت‌فشار (مثلا باخراشیده شدن) به‌داخل ناحیهٔ تحت‌کشش که درشکل ۸-۷-۵ دیده می‌شود نفوذکند، ممکن است به‌سرعت و خودبه‌خود گسترش یابد. حـاصل این اثر را می‌توان درشیشهٔشکستهٔ عقب اتومبیل دید که به‌جای آنکه به‌صورت خرده شیشه‌های تیز باشد به‌شکل طرح موزائیك است.




**شکل ۸-۷-۵** فشار درسطح درشیشهٔ بازپخت شده، نیروی کششی برای به‌وجود آوردن شکست در سطح نخست باید تنشهای فشاری را خنثی کند.

حل: الف) شکل ۸-۷-۶ صفحهٔ (۱۱۰) را برای‌ساختار نوع NaCl نشان می‌دهد. هر صفحه فقط یك‌مجموعه جهات لغزش داردکه در این‌حالت [۱$\bar{۱}$۰] یا منفی آن [$\bar{۱}$۱۰] است. ازآنجاکه در {۱۱۰} شش‌صفحه وجود دارد، شش سیستم لغزش عبارت‌اند از

$$[\text{۱}\bar{\text{۱}}\text{۰}](\text{۱۱۰}) \quad [\bar{\text{۱}}\text{۰۱}](\text{۱۰۱}) \quad [\text{۰}\bar{\text{۱}}\text{۱}](\text{۰۱۱})$$

$$[\text{۱۱۰}](\text{۱}\bar{\text{۱}}\text{۰}) \quad [\text{۱۰۱}](\text{۱۰}\bar{\text{۱}}) \quad [\text{۰۱۱}](\text{۰۱}\bar{\text{۱}})$$

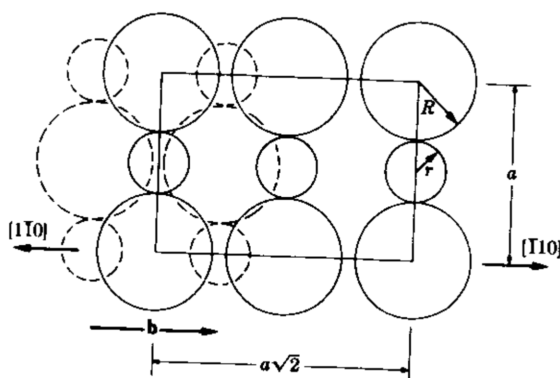
ب) ازآنجا که

$$r_{\text{Mn}^{۲+}} = \text{۰٫۰۸۰ nm} \quad \text{و} \quad R_{\text{S}^{۲-}} = \text{۰٫۱۸۲ nm}$$

$$a = \text{۰٫۵۲۸ nm}$$

$$\mathbf{b} = (\text{۰٫۵۲۸ nm})\frac{\sqrt{۲}}{۲} = \text{۰٫۳۷۳ nm}$$

▲




**شکل ۸-۷-۶** صفحهٔ (۱۱۰) ساختار نوع NaCl. سیستم لغزش (۱۱۰) [۱$\bar{۱}$۰] و بردار لغزش b برابر $a\sqrt{۲}$ است. (دایره‌های خط چین مکانهای اتمها درصفحات (۱۱۰) مشخص شده را نشان می‌دهد. (مثال ۸-۷-۱ را ببینید.)

**مثال ۸-۷-۲** استحکام‌شیشه ازنظر تئوری از 7000 MPa بیشتر است. استحکامی نزدیك به‌این مقدار در شیشه به‌وجود آمده است. قطعه‌ای از این شیشه در اثر کشش خمشی 60 MPa شکسته است. اگر برای نوك ترك ابعادی به اندازهٔ یون اکسیژن فرض شود، عمق ترکی که دراین تنش‌کم موجب شکست شده‌است چقدر است؟

حل: از رابطهٔ (۸-۷-۱) و با فرض‌آنکه $r = 0.14\ \text{nm}$ است، داریم

$$c = \frac{r(\sigma/s)^2}{4} = \frac{(0.14\ \text{nm})(7000/60)^2}{4} = 480\ \text{nm}$$

**توضیح.** ترکهایی به‌این‌اندازه در سطوح شیشه‌ای که در محیطهای معمولی وجود دارد نیز مشاهده می‌شود؛ ولی روش‌ویژه‌ای برای مشاهدهٔ آنها لازم است، زیرا این ابعاد نزدیك به‌حد تفکیك نور مرئی است.

شیشهٔ بازپخت شده مسطح می‌تواند بار بیشتری را تحمل کند، زیرا قبل‌از آنکه تنشها براثر کشش تمرکز یابند، تنش فشاری پوسته (شکل۸-۷-۵) باید افزایش یابد. ▲

## □ ۸-۸ فرایندهای مواد سرامیکی

قسمت‌اعظم محصولات‌سرامیکی بایکی از دوفرایند عمومی‌شکل‌دادن ویسکوز یا باتفجوشی به‌وجود می‌آیند. شکل دادن ویسکوز شامل ذوب‌کردن و شکل‌دادن مایع ویسکوز است. فرایند تفجوشی از ذرات بسیار ریزی که به‌شکل مطلوب تجمع یافته‌اند آغاز می‌شود که معمولا پس‌از آن، محصول پخته می‌شود تا بین ذرات پیوند برقرار شود. فرایند سوم‌که کاربرد گسترده ولی ویژه‌ای دارد، پیوند شیمیایی است، مثل آبدارکردن سیمان پرتلند. این‌بخش فقط به‌دو فرایند اول یعنی‌شکل‌دادن ویسکوز و تفجوشی می‌پردازد. آبدارکردن سیمان همراه بابتن (در بخش ۱۳-۲) بعداً شرح داده می‌شود. دراین متن‌رشد تك‌بلورها و فرایندهای ویژهٔ دیگر، یا آماده‌سازی مواد مثل خالص‌کردن یا خشك‌کردن توسط افشاندن، بررسی نمی‌شود.

**شکل‌دادن ویسکوز.** شیشه‌های تجارتی با این فرایند ساخته می‌شوند. شیشه اگر گرم شود، به‌حدی گرما نرم می‌شودکه می‌توان آن را به‌صورت محصول نهایی شکل داد. ولی‌قبل‌از شکل‌دادن نهایی، لازم است اکسیدهای ترکیب‌کنندهٔ آن را ذوب‌کرد تاترکیبی همگن به‌دست‌آید و گازهای حبس‌شده درآن خارج شود. خروج گازها اهمیت ویژه‌ای دارد زیرا سودا و آهك موجود در شیشه‌ها (جدول ۸-۵-۱) از $Na_2CO_3$ و $CaCO_3$ به‌دست می‌آیدکه هردو ترکیب، $CO_2$ آزاد می‌کنند. واضح است‌که حباب هوایی‌که در شیشه باقی می‌ماند نوعی عیب است. فرایند نهایی شکل‌دادن می‌تواند پرس‌کردن (در

شیشه‌های ساختمانی)، یا نشکن‌کردن (در پنجره‌های بسیاری از اتومبیلها)، یا دمیدن (در مورد حبابهای لامپ)، یا کشیدن (در رشته‌های شیشه‌ای [شکل ۸-۱-۱ (د)]) و ... باشد.

شیشه‌های سرامیکی، بسیاری از ویژگیهای پلی‌مرهای گرما نرم را دارند. درحقیقت دمای شیشه‌ای $T_g$ برای اولین بار در شیشه‌های سیلیسی شناخته شد (شکل ۴-۵-۳). ویسکوزیتهٔ $\eta$ شیشه در برابر دما حساس است:

$$\log_{10}\eta = C' + \frac{B'}{T} \qquad (۸-۸-۱)$$

که در آن $C'$ و $B'$ برای شیشه ثابت* است.

کنترل ویسکوزیته در ساخت شیشه اهمیت دارد. در درجهٔ اول شیشه باید در گسترهٔ ذوب ویسکوزیتهٔ پایین (کمتراز ۳۰ Pa.sec، یاکمتراز ۳۰۰ پواز) داشته باشد تا همان طورکه دربالا گفته‌شد حبابها بتوانند خارج شوند وهمگن‌شدن صورت گیرد. گسترهٔ کار چندین رقم بامعنی را دربر می‌گیرد. عملیات سریع مانند تولید حبابهای لامپ به‌شیشهٔ نسبتاً سیالی‌نیاز دارد ($\sim 10^{2.5}$ Pa . sec یا $10^{3.5}$ پواز)؛ عملیات کشش‌ورقهای سنگین شیشه به‌محصولی باویسکوزیتهٔ بیشتر ($\sim 10^{6}$ Pa . sec) نیاز دارد.

دونقطه دیگر ازنظر ویسکوزیته اهمیت دارند: (۱) نقطهٔ تابکاری، دمایی با $\eta = 10^{12}$ Pa . sec (یا $10^{13}$ پواز)، و(۲) نقطهٔ‌کرنش، دمایی‌با $\eta = 10^{13.5}$ Pa . sec.
در دمای نقطهٔ تابکاری، اتمها می‌توانند به‌اندازهٔ کافی حرکت کنند به‌طوری‌که تنشهای گرمایی باقی مانده درمدت ۱۵ دقیقه ازبین بروند. زمانی که باجدول زمانبندی تولید سازگار است. زیرنقطهٔ کرنش، شیشه‌به‌حدی صلب است که بدون ایجاد تنشهای باقیماندهٔ جدید قابل‌حمل است. نقطه کرنش زیر دمای انتقال شیشه‌ای است.

---

* جریان یافتن شیشه به‌حرکت اتمها به‌دنبال اتمهای دیگر نیاز دارد و بنابراین به‌انرژی فعالسازی $E$ بستگی دارد. شیشه‌ای که سیالیت زیاد، $f$ (ویسکوزیتهٔ کم، زیرا $\eta = 1/f$) دارد، شیشه‌ای‌است که نفوذ درآن سریع صورت می‌گیرد. بنابراین همانطورکه در روابط (۴-۶-۶) و (۴-۷-۴) داشتیم

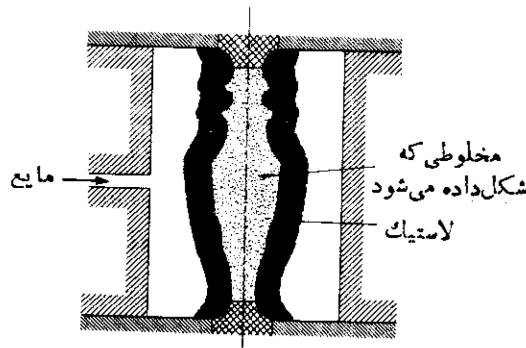
$$\ln f = \ln f_0 - E/kT = -\ln\eta \qquad (۸-۸-۲)$$

حال این معادله رابطهٔ (۸-۸-۱) را به‌وجود می‌آورد. ازآنجا که $\ln\eta = 2.3 \log\eta$، عبارات $C'$ و $B'$ به‌ترتیب برابر $-\ln f_0/2.3$ و $E/2.3k$ خواهند بود. سیالیت، نفوذپذیری ($m^2/sec$) بر واحد نیرو است. بنابراین ویسکوزیتهٔ ابعاد Pa.s دارد. واحدهای اولیهٔ آن در دستگاه cgs «پواز» بودکه در این‌حالت $1 Pa.s = 10$ پواز.

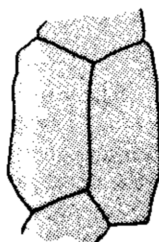
**فرایندهای تفجوشی.** بیشتر سرامیکهای غیرشیشه‌ای از ذرات بسیار ریز شده‌ای ساخته شده‌اند و پس از تفجوشی (پختن) به‌محصول یکپارچه تبدیل می‌شوند. هنرمندان، روش ماقبل‌تاریخ، که استفاده از رس بسیار نرم شده است، را به‌کار می‌برند. این رس هنگامی که خیس باشد هیدروپلاستیکی است. محصولاتی مانند آجر را می‌توان به‌صورت دلخواه شکل داد و خشك کرد، سپس پخت به‌طوری که ذرات تغییر یافته رس به‌هم جوش بخورند و پیوندی قوی وسخت به‌وجود آورند. همچنین می‌توان سرامیکها را با تعلیق، یا خمیری کردن به‌صورتی درآورد که‌بتوان آنها را درقالب گچی متخلخل ریخت. این‌عمل‌ریخته گری خمیری نامیده می‌شود. قالب، آب موجود در خمیر مجاور دیوارهٔ قالب را می‌گیرد. محصول‌سپس خشك و پخته می‌شود. این فرایند باانقباض قابل‌ملاحظه‌ای همراه است زیرا ضریب فشردگی ذرات جامد درقطعهٔ ریختگی خمیری اولیه کم است.

محصولات سرامیکی صنعتی معمولا بافرایند پرسکاری شکل می‌گیرند. عایق‌شمع، که تابه‌حال چندبار به‌آن اشاره کرده‌ایم، با قالبگیری ایزوستاتیك ساخته می‌شود (شکل ۸-۸-۱). این فرایند ازنظر ساخت‌مزیت مهمی‌داردکه عبارت است از اینکه اعمال فشار بالا به‌طور یکنواخت ممکن است. همچنین مقدار قابل اغماضی مایع نرم‌کننده لازم است که باید خشك شود. در نتیجه انقباض بعدی کم و به‌آسانی قابل‌کنترل است. البته برای پخته‌شدن یا تفجوشی دماهای بالا لازم است، زیرا این عایقها عمدتاً $Al_2O_3$ هستند. این اکسیدها پیوندهایی‌قوی دارند و بنابراین برای حرکت اتمها نفوذپذیری آنها کم است.

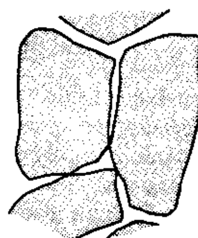
تفجوشی برای تجمع ذرات ریز به‌صورت تودهٔ مواد، گرما لازم دارد. تفجوشی بدون تشکیل مایع، به‌نفوذ در داخل جامد نیاز دارد و بنابراین در دماهای بسیار بالا (کمتراز نقطهٔ ذوب) بسیار سریعتر انجام می‌پذیرد. بسیاری از فلزات به‌صورت گرد در آمده و سرامیکهای دی‌الکتریك و مغناطیسی با تفجوشی در حالت جامد تولید می‌شونده




**شکل ۸-۸-۱** قالبگیری ایزواستاتیك (ساخت شمع اتومبیل) سیال هیدروستاتیك به‌صورت شعاعی به‌محصول فشار وارد می‌کند. در این روش بیشینهٔ فشردگی امکانپذیر است.



(ب)



(الف)

**شکل ۸-۸-۲** تفجوشی درحالت جامد. الف) ذرات قبل‌از تفجوشی دو سطح‌مجاور هم‌دارند؛ ب) دانه‌ها پس‌از تفجوشی‌یک‌مرزدانه دارند. نیروی محرکهٔ تفجوشی کاهش سطح (و بنابراین کاهش انرژی سطحی است).

این موادسرامیکی را نمی‌توان باذوب‌کردن ساخت، واغلب بوتهٔ ذوب یاقالبی برای این کار در دسترس نیست.

اصول حاکم برتفجوشی درحالت جامد در شکل ۸-۸-۲ دیده می‌شود. طبق قسمت (الف)، بین هردو ذره، قبل‌از تفجوشی دوسطح وجود دارد. پس‌از تفجوشی، فقط یک مرزدانه وجود خواهد داشت. این دوسطح مرزهایی با انرژی بالایند؛ مرزدانه انرژی بسیار کمتری‌دارد. بنابراین اگر انرژی برای حرکت تعداد کافی از اتمها کفایت‌کند، این واکنش به‌طور طبیعی صورت می گیرد.

مکانیسم واقعی‌تفجوشی درشکل ۸-۸-۳ به‌صورت عکسهایی‌که‌توسط میکروسکوپ الکترونی گرفته شده دیده می‌شود. نقاط تماس بین ذرات، با نفوذ اتمها، زیاد می‌شود. نفوذ خالص آنها موجب‌انقباض وبه‌همراه آن کاهش تخلخل می‌شود. شکل‌۸-۸-۴ پیشرفت واکنش تفجوشی را برای سدیم فلورید نشان می‌دهد.

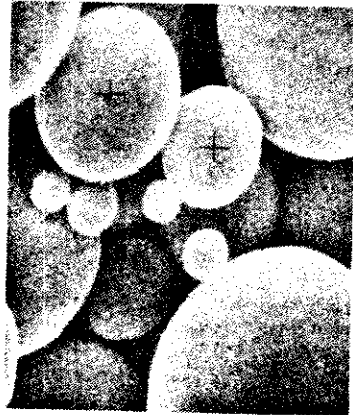
**مثال ۸-۸-۱** گسترهٔ کاربرد شیشهٔ الکتریکی از $870\ ^{\circ}C$ ($\eta = 10^{6}\ Pa \cdot s$، یا $10^{7}$ پواز) تا $1300\ ^{\circ}C$ ($\eta = 10^{2.5} Pa\cdot s$، یا $10^{3.5}$ پواز) است. نقطهٔ تابکاری آن ($\eta = 10^{12}\ Pa \cdot s$، یا $10^{13}$ پواز) را تخمین بزنید.

حل: از رابطهٔ (۸-۸-۱)

$$6 = \frac{C' + B'}{870 + 273}$$

$$2.5 = \frac{C' + B'}{1300 + 273}$$

با حل این دو رابطه



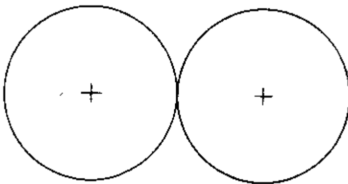
(الف)

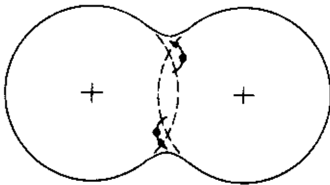


(ب)



(ج)





(د)

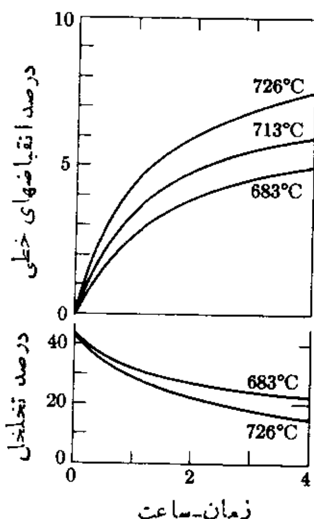
**شکل ۸-۸-۳** تفجوشی (گــرد نیکل). نقاط تماس اولیه در الف) درحین گــرم کردن تادمای $1100\ ^\circ C$ در ب) و ج) به‌صورت‌سطح در می‌آید؛ د) اتمها از نقاط اتصال نفوذ می‌کنند تاسطح اتصال را وسعت بخشند. (تهیجایها درجهت‌مخالف نفوذ می‌کنند.) ذرات گرد به‌هم نزدیکتر می‌شوند، و مقدار سطح ذرات کاهش می‌یابد.

$$B' = ۱۴۶۰۰ \quad \text{و} \quad C' = -۶٫۸$$

برای $\eta = ۱۰^{۱۲} \mathrm{Pa \cdot s}$

$$۱۲ = -۶٫۸ + \frac{۱۴۶۰۰}{T}$$

$$T = ۷۷۵\mathrm{K} (\simeq ۵۰۰\ ^\circ\mathrm{C})$$




**شکل ۸-۸-۴** انقباض حاصل از تفجوشی(NaF). NaF گرد شده (با عدد غربال ۳۳۰-). درحین تفجوشی هنگامی که منقبض می‌شود، تخلخل خود را از دست می‌دهد.

توضیح. نقطهٔ نابکاری تقریباً بادمای شیشه‌ای، $T_g$ برابر است. ▲

**مثال ۸-۸-۲** مغناطیسی‌سرامیکی قبل‌از تفجوشی ۲۸ v/o تخلخل دارد و پس‌از تفجوشی چگالی آن $5.03\ g/cm^3$است.چگالی حقیقی $5.14\ g/cm^3$ ($5.14\ Mg/m^3$)است. الف) پس‌ازپختن (تفجوشی)تخلخل چقدراست؟ب)اگربخواهیم اندازهٔ نهایی‌آن ۱۶٫۳ باشد اندازهٔ قالب چقدر باید باشد؟

حل:

الف)

$$\text{حجم‌واقعی ۱ گرم} = \frac{1}{5.14} = 0.1946\ cm^3$$

$$\text{حجم ۱ گرم پس‌از تفجوشی} = \frac{1}{5.03} = 0.1988\ cm^3$$

$$\text{تخلخل نهایی} = \frac{0.1988 - 0.1946}{0.1988} = \%2$$

$$\text{حجم حقیقی} = 0.72\ V_o = 0.98\ V_f$$

ب)

$$\frac{V_o}{V_f} = \frac{L_o^3}{L_f^3} = \frac{0.98}{0.72}$$

$$L_o = L_f \sqrt[3]{\frac{0.98}{0.72}}$$

$$=(16.3\ \text{mm})(1.108)=18.1\ \text{mm}$$

توضیح. این مسئله از راههای مختلفی قابل‌حل است. ولی استفاده از مبنای یك‌گرم مناسب است زیرا مقایسهٔ مستقیم تغییر حجم را ممکن می‌سازد.

توجه داشته باشید که اگر قالب برای ۱۰٪ انقباض درنظر گرفته شود (۱۸٫۱ mm به ۱۶٫۳ mm)، روش فرایند باید طوری باشد که همیشه ۲۸٪ تخلخل درمرحلهٔ پرس کردن (تفجوشی‌مقدماتی) وجود داشته باشد. درغیراین‌صورت ویژگیهای ابعادی ازدست خواهد رفت. متغیرهای فرایند باید دقیقاً کنترل شود. ▲

**مثال ۸-۸-۳** چگالی‌حقیقی‌یك آهنربای سرامیکی $5.41\ \text{Mg/m}^3\ (=5.41\ \text{g/cm}^3)$ است. نمونهٔ‌اندکی‌تفجوشی شدهٔ آن به‌صورت خشك ۳٫۷۹ گرم و اشباع شدهٔ آن باآب، ۳٫۸۴ گرم وزن دارد. نمونهٔ اشباع شده وقتی در آب غوطه‌ور می‌شود ۳٫۰۸ گرم وزن دارد. الف) حجم حقیقی آن چقدر است؟ ب) حجم ظاهری آن (کل حجم) چقدراست؟ ج) تخلخل ظاهری (باز) آن‌چقدر است؟ د) کل تخلخل آن چقدر است؟

حل:

الف)
$$\text{حجم حقیقی}=\frac{3.79\ \text{g}}{5.41\ \text{g/cm}^3}=0.70\ \text{cm}^3$$

ب) با استفاده ازقانون ارشمیدس

$$\text{حجم آب‌جابه‌جا شده توسط نمونه}=3.84\ \text{g}-3.08\ \text{g}=0.76\ \text{g}$$

$$\text{کل‌حجم}=\frac{0.76\ \text{g}}{1\ \text{g/cm}^3}=0.76\ \text{cm}^3$$

این شامل ماده به‌علاوهٔ تمام فضای منفذهاست.

ج)
$$\text{تخلخل باز}=\left[\frac{(3.84-3.79\ \text{g})}{(1\text{g/cm}^3)}\right]/0.76\ \text{cm}^3$$

$$=0.066 \qquad \text{(براساس حجم ظاهری, ۶٫۶ v/o یا)}$$

د)
$$\text{کل تخلخل}=\frac{0.76-0.70\ \text{cm}^3}{0.76\ \text{cm}^3}$$

$$=0.079 \qquad \text{(براساس حجم ظاهری‌و ۷٫۹ v/o یا)}$$

توضیح. تخلخل بسته برابر ۱٫۳ v/o است. چگالی توده‌ای برابر $3.79\ \text{g}/0.76\ \text{cm}^3=5.0\ \text{g/cm}^3$ است. چگالی ظاهری‌رامی‌توان به‌این‌صورت

نیز تعریف کرد

$$\frac{\text{جرم}}{\text{حجم توده} - \text{حجم منفذهای باز}}$$

این چگالی برابر است با

$$\frac{۳٫۷۹\,g}{(۰٫۷۶\,cm^3)(۱ - ۰٫۰۶۶)} = ۵٫۳۴\,g/cm^3 \;(\text{یا } ۵٫۳۴\,Mg/m^3) \quad ▲$$

## مرور و بررسی مطالب

چون فازهای سرامیکی ازعناصرفلزی وغیرفلزی تشکیل شده‌اند، توصیف کلـی ساختار و خواص آنها به‌سادگی فلزات یا غیر فلزات مقدورنیست. مثلا فلـزات همواره رسانـای الکتریسیته وگرمایند، بیشتر سرامیکها عایق‌اند ولی برخی از آنها خاصیت نیمرسانندگی دارندکه‌کاربرد فنی دارد. ورقه‌های نازکی ازپلی مرهای آلی همیشه نورراز خود عبور می‌دهند؛ حال آنکه سرامیکها می‌توانند مانندشیشهٔ شفاف یا مانند اسپینلهای مغناطیسی کدر باشند. سرامیکهای ساختمانی، تحت فشار، بسیارمحکـم ودرکشش ضعیف‌انـد. استحکام کششی الیاف شیشه‌ای می‌تواندازفولاد هم بیشترباشد بنابراین ازآن به‌عنوان‌تقویت‌کننده استفاده می‌شود. شیشه نیزماده‌ای‌ترد وشکننده به‌شمار می‌آید که هنگـام حمل‌ونقل به‌دقت زیادی نیازدارد.

مثالهای فوق‌تنهاچندمورد ازشواهدی است‌که‌نشان می‌دهند مواد سرامیکی‌می‌توانند خواص بسیار متنوعی‌داشته باشند. بسیاری ازآنها برای تکنولوژی امروزضروری‌اند،ولی ازسایرمواد پیچیده‌ترند و بنابراین به‌آشنایی فنی ومطالعهٔ بیشتری نیازدارند.

## خلاصه:ساختار سرامیکها

ترکیبات سرامیکی ساده‌تررامی‌توان به‌صورت شبکه‌ای ازآنیونها درنظر گرفت‌که‌کاتیونها درمحلهای معینی دربین آنها قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مدل اصلی ساختارهای نوع $CsCl$ و $NaCl$ و $ZnS$ را بررسی‌کردیم کـه درآنهاکاتیونها بـه‌ترتیب درمحلهای بین‌نشینی 8-f، 6-f و 4-f قرارمی‌گیرند. این نوع ساختارها درجدول ۸ـ۲ـ۱ خلاصه شده‌اند بـا مشاهدهٔ چگونگی ترتیب‌کاتیونها در محلهای بین‌نشینی 4-f و 6-f ساختارهای‌پیچیده‌تری مانند ساختار متعلق به اسپینلهای مغناطیسی را می‌توان تحلیل‌کرد.

شیشه‌ها بیشترازسایرترکیبات‌سرامیکی پیوندکووالانسی دارند. اساس ساختارآنها واحدهای چهاروجهی $SiO_4$ است‌که درآنها سیلیسیم بـا چهـاراکسیژن کوئوردینانس شده است. در سیلیس خالص‌که در آن فقط سیلیسیم و اکسیژن مـوجـود است، هراتم اکسیژن به‌عنوان پلی بین‌دوواحد چهاروجهی عمل می‌کند وشبکه‌ای صلب تشکیل می‌دهد.

افزایش اکسیدهای دیگر موجب قرار گرفتن اکسیژن در خارج از این پلها می‌شود و بنابراین شبکه را اصلاح می‌کند و شیشه را گرما نرم‌تر می‌کند.

## خلاصه: خواص و رفتار سرامیکها

عایقهای سرامیکی طوری طرح می‌شوند که از نظر الکتریکی بی‌اثر باشند. با این حال یونهای موجود می‌توانند به میدان الکتریکی پاسخ دهند، و موجب قطبش در مادهٔ دی‌الکتریک شوند. ضریب دی‌الکتریک حاصل در خازنها کاربرد مفیدی دارد؛ ولی اگر تغییر مکان یونها نسبت به میدان الکتریکی تأخیر داشته باشد، موجب اتلاف توان خواهد شد. قطبش دائمی، خاصیت پیزوالکتریکی ایجاد می‌کند که به ایجاد ترانسدیوسرهای الکترومکانیکی منجر می‌شود. سرامیکهای نیمرسانا، خاصیت خود را مدیون اتمهایی‌اند که حالتهای چندظرفیتی دارند. لازمهٔ وجود سرامیکهای مغناطیسی، یونهایی‌اند که مدارهای زیرظرفیتی پر نشده دارند. در این حالت هر اتم مانند آهنربای کوچکی عمل می‌کند. در مجموع حوزه‌های مغناطیسی به‌وجود می‌آیند که به میدان مغناطیسی پاسخ می‌دهند.

ترکیبات سرامیکی، با بین فلزی، در برابر تغییر شکل برشی به‌شدت مقاومت می‌کنند. درنتیجه به شکاف (یا ترك) حساس‌اند. به‌همین علت استحکام کششی آنها کم است. ولی مقاومت آنها در برابر برش موجب می‌شود که استحکام فشاری زیادی داشته باشند. پس مواد سرامیکی برای استفاده در سازه‌ها یا طراحی محصولاتی که تحت فشار قرار می‌گیرند برگزیده می‌شوند. همچنین، مواد سرامیکی در مهندسی طوری ساخته می‌شوند که در سطح تحت فشار باشند. درصورتی که نیرو اعمال شده باشد ویسکوزیتهٔ شیشه از همان قوانین نفوذ پیروی می‌کند.

## سؤالات تشریحی

۱. فهرستی از شش مادهٔ سرامیکی بنویسید که کاربرد فنی داشته باشند و در این کتاب دربارهٔ آنها بحث نشده باشد.

۲. تفاوت بین ساختارهای نوع CsCl، نوع NaCl، و نوع ZnS را با توجه به عدد کوئوردیناسیون مربوط به کمینهٔ نسبت اندازهٔ یون، و تعداد یونها در هر سلول واحد، بنویسید.

۳. دو مادهٔ KCl و MnSe ساختار مشابهی (نوع NaCl) دارند. اگرچه $K^+$ سبکتر از $Mn^{2+}$ (۳۹ amu در مقابل ۵۵ amu) و $Cl^-$ سبکتر از $Se^{2+}$ است، ثابت شبکهٔ KCl ($a>$ ۰٫۶ nm) بیشتر از MnSe ($a<$ ۰٫۶ nm) است. علت آن را شرح دهید.

۴. آرایش اتمی صفحهٔ $(1\bar{1}0)$ در ZnS را رسم کنید. (برای $CaF_2$، به شکل ۸-۳-۲ رجوع کنید.) برای صفحهٔ (۱۱۰) این عمل را تکرار کنید.

۵. مطابق با شکل ۸-۴-۱، $BaTiO_3$ مکعبی در مرکز هر وجه اتم اکسیژنی دارد. ولی

ساختار آن مکعبی با وجوه مرکزدار نیست. چرا؟

۶. شکل ۴-۳-۱ با یونهای $Mg^{2+}$، $Fe^{2+}$، و $O^{2-}$، وشکل ۸-۴-۱ با یونهای $Ba^{2+}$، $Ti^{4+}$، و $O^{2-}$ هردو، سه‌نوع یون دارند. یکی‌از آنهارا محلول جامد و دیگری را ترکیب $A_mB_nX_p$ می‌نامیم. علت این تفاوت چیست؟

۷. MnO و MnS هردوساختارنوع NaCl دارند. مقدارمحدودی جامد $(\sim 1 a/o)$ دیده می‌شود. مکانیسم آن‌را بنویسید. چرا مقدار محلول جامد محدود است؟

□ ۸. شکلی‌از آرایهٔ‌منشورشش برهسته‌های اتمی رسم کنید. اکنون لایهٔ دومی را که می‌تواند در بالای لایهٔ اول به‌صورت فشرده قرار گیرد به‌صورت خط‌چین رسم کنید. مکانهای شش‌تایی بین دولایه را نشان دهید؛ مکانهای چهارتایی دولایه را نیز نشان دهید.

□ ۹. MnTe دارای دوچند شکلی‌است. یکی ساختار نوع NaCl، و دیگری ساختار نوع NiAs دارد. درهریك از موارد $Mn^{2+}$ بین شش یون $Te^{2-}$ می‌نشیند. ولی بسیارنرمتروانعطاف پذیرترازدومی است. علت‌را شرح دهید.

۱۰. با استفاده ازنقاط الکترونی [به‌شکل ۲-۲-۳ (الف) رجوع کنید]. پیوندکووالانسی را دریون $SiO_4^{4-}$ نشان دهید. پیوندهای یونی را نیزنشان دهید.

۱۱. ساختارکریستوبالیت (شکل ۸-۵-۲) را با ساختار ZnS (شکل ۸-۲-۴) و با سیلیسیم‌که ساختار الماس(شکل ۲-۲-۴) را دارد، مقایسه کنید.

۱۲. کریستوبالیت هنگامی‌که ذوب می‌شود و به‌سیلیس مذاب تبدیل می‌شود، تقریباً انبساطی ندارد. علت آن را شرح دهید.

۱۳. فرق بین اکسیژن پلساز و اکسیژن غیرپلسازواثرآنها را روی تغییرشکل شیشه در بالای دمای شیشه‌ای شرح دهید.

۱۴. $B_2O_3$ به‌خوبی شیشه تشکیل می‌دهد. ساختار آن و رفتار ویسکوز آن را باسیلیس ذوب‌شده $(SiO_2)$ مقایسه کنید.

۱۵. اکسید باید چه ویژگی خاصی داشته باشد تا درساختار شیشه به‌عنوان اصلاح‌کنندهٔ شبکه عمل‌کند؟ شش اکسید را نام ببریدکه این نقش را داشته باشند.

۱۶. الف) دو راه تأثیر ترك روی عایق الکتریکی را شرح دهید. (ب) چرا عایقها قبل ازاستفاده در خطوط ولتاژ بالا لعاب داده می‌شوند؟

۱۷. تفاوت بین ثابت دی‌الکتریك و استحکام دی‌الکتریك را بنویسید.

۱۸. نیمرساناهای سرامیکی معمولاحاوی‌فلزاتی‌اندکه شیمیدانها آنها را فلزات واسطه می‌نامند (گروه B درشکل ۲-۱-۱). چرا اکسیدهای این فلزات نیمرسانا هستند؟

۱۹. برای‌کسی‌که این درس را نگرفته است شرح دهیدکه چرا کارتریجهای سرامیکی درگرامافون سیگنالی ایجاد می‌کنندکه قابل تقویت‌کردن است؟

۲۰. مفهومی برای شمع پیزوالکتریك بنویسید.

□ ۲۱. با استفاده ازپیوست (ب) تعداد مگنتونهای بوهر (الکترونهای جفت نشدهٔ $3d$ در

هر اتم) متعلق به‌عناصری با عدد اتمی بین ۲۰ و ۳۰ را ذکر کنید.

□ ۲۲. معمولا در MnO خاصیت مغناطیسی مشاهده نمی‌شود؛ با وجود آنکه هر کاتیون متعلق به‌پنج مگنتون بوهر است، و آزمایش نشان می‌دهد که MnO به تغییرات میدان مغناطیسی پاسخ می‌دهد. دلیلی برای مغناطیسی نبودن آن ذکر کنید. (MnO ساختار نوع NaCl دارد.)

۲۳. چرا نتایج آزمایش کشش درسرامیکها نسبت به‌فلزات پراکندگی بیشتری نشان می‌دهد؟

۲۴. یونهای $Na^+$ در شیشه را می‌توان به‌صورتی ازسطح خارج کرد و به‌جای آن یونهای $K^+$ قرارداد (این کار تعویض یونی نامیده می‌شود). اگر این کارزیردمای انتقال شیشه‌ای صورت گیرد، استحکام شیشه تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. این فرایندگاهی بازپخت شیمیایی نامیده می‌شود، زیرا اثرات آن روی خواص مشابه با بازپخت درشکل ۸—۷—۵ است. علت افزایش استحکام چیست؟

۲۵. سوارکردن ابزار برش سرامیك ($Al_2O_3$) روی دستگاه تراش باید باابزارساخته شده ازفولاد «تندبُر» متفاوت باشد چرا؟

۲۶. لعاب بشقابهای غذاخوری طوری انتخاب می‌شودکه ضریب انبساط گرمایی لعاب کمی کمترازچینی زیرآن باشد. شرح دهیدکه چرا این کار محصول را پراستحکامتر می‌کند.

## مسائل

۸—۲—۱ چگالی CsCl را ازداده‌های‌موجود درپیوست محاسبه کنید. (یادآوری‌می‌شود که $CN = 8$ است.)

جواب: $3.94\ Mg/m^3$

۸—۲—۲ CsCl ساختار مکعبی‌ساده‌ای ازیونهای $Cl^-$ داردکه یونهای $Cs^+$ درمحلهای ۸ گانهٔ آن قرارگرفته‌اند. الف) شعاعهای آنها به‌ترتیب $0.187\ nm$ و $0.172\ nm$ است، برای $CN = 8$، ضریب فشردگی چقدر است؟ ب) اگر $r/R = 0.73$ باشد، این ضریب چقدر خواهد بود؟

۸—۲—۳ ترکیب بین‌فلزی AlNi ساختارنوع CsCl داردکه درآن $a = 0.2881\ nm$ است. چگالی آن را حساب کنید.

جواب: $6.0\ Mg/m^3$

۸—۲—۴ داده‌های اشعهٔ X نشان می‌دهد که ابعاد سلول واحد مکعبی MgO برابر $0.42 nm$ است. چگالی‌آن $3.6\ Mg/m^3$ است. چه تعداد $Mg^{2+}$ ویون $O^{2-}$ در هر سلول واحد وجود دارد؟

۸-۲-۵ درساختار پریکلاس (MgO) یونهای $O^{2-}$ به صورت fcc قرار گرفته‌اند و یونهای $Mg^{2+}$ در تمام مکانهای شش‌گانه جای گرفته‌اند. الف) شعاعهای آنها به‌ترتیب ۰٫۱۴۰ nm و ۰٫۰۶۶ nm است، ضریب فشردگی آن چقدر است؟ (ب) اگر $r/R = ۰٫۴۱$ باشد این ضریب چقدر خواهد بود؟

جواب: الف) ۰٫۷۳ ب) ۰٫۸۰

۸-۲-۶ اکسید نیکل مکعبی است و چگالی آن برابر $۶٫۸۷ Mg/m^3$ ($= ۶٫۸۷ g/cm^3$) است. ثابت شبکهٔ آن ۰٫۴۱۷ nm است. درهرسلول واحد آن‌چه تعداد اتم وجود دارد؟ (یون نیکل $Ni^{2+}$ است.)

۸-۲-۷ چگالی لیتیم فلورید $۲٫۶ Mg/m^3$ و ساختار آن از نوع NaCl است. از این داده‌ها برای محاسبهٔ اندازهٔ سلول واحد، $a$، استفاده کنید و جواب را با مقدار به‌دست آمده از شعاع یونی مقایسه کنید.

جواب: ۰٫۴۰۵ nm درمقابل ۰٫۴۰۲ nm

۸-۲-۸ چگالی ZnS (شکل ۸-۲-۴) برابر $۴٫۱ Mg/m^3$ است. براساس این مقدار، فاصلهٔ بین مراکز دو یون چقدر است؟

**۸-۲-۹** چگالی دوچند شکلی MnS درمثال ۸-۲-۴ را تخمین بزنید.
جواب: الف) $۳٫۹ Mg/m^3$ ب) $۳٫۴ Mg/m^3$

**۸-۲-۱۰** درکتابهای شیمی برای $NH_4Cl$ چگالی $۱٫۵ g/cm^3$ (یا $۱٫۵ Mg/m^3$) داده شده است. اشعهٔ X نشان می‌دهد که $NH_4Cl$ دوچند شکلی دارد: یکی ساختار نوع NaCl دارد که در آن $a = ۰٫۷۲۶$ nm است، و دیگری ساختار نوع CsCl دارد که در آن $a = ۰٫۳۸۷$ nm است. چگالی فوق‌متعلق به کدام چند شکلی است؟ (یون $NH^{4+}$ به‌عنوان یك واحد، شبکهٔ بلوری را اشغال می‌کند.)

**۸-۲-۱۱** به‌فرض آنکه درفشار بالا NaCl بتواند به‌ساختار نوع CsCl تبدیل شود درصد تغییر حجم چقدر خواهد بود؟ (به‌پا نوشت پیوست (ب) در مورد شعاع مربوط به $CN = ۶$ و $CN = ۸$ توجه کنید.)

جواب: ۱۶٪ —

۸-۳-۱ درصورتی که $CN = ۴$ باشد $R_{O^{2-}} = ۰٫۱۲۷ nm$ (جدول ۲-۵-۱). درصورتی که $CN = ۸$ باشد $r_{Zr^{4+}} \simeq ۰٫۰۸۵ nm$، اندازهٔ سلول واحد $ZrO_2$ را که ساختار نوع $CaF_2$ دارد تخمین بزنید.

جواب: ۰٫۴۹ nm (درمقابل ۰٫۵۰۷ nm که از آزمایش به‌دست آمده است.)

۸ــ۳ــ۲ با استفاده ازشعاع به‌دست‌آمده ازمثال۸ــ۳ــ۲، آیا اندازهٔ برآورده شدهٔ سلول واحدازمقدار تجربی$a=$ ۰٫۵۴۷nm بزرگتراست یاکوچکتر؟(برای تشریح آن به‌توضیح‌مثال ۸ــ۳ــ۱ توجه کنید.)

**۸ــ۳ــ۳** اندازهٔ سلول واحد $UO_2$، یعنی $a$، برابر۰٫۵۴۷ nm است. الف) براساس این اطلاعات وشکل۸ــ۳ــ۱، چگالی‌خطی یون $U^{4+}$ درجهات ⟨۱۱۰⟩ چقدراست؟ برای یون $O^{2-}$ چطور؟ ب) چگالی‌خطی‌یون$U^{4+}$ درجهات ⟨۱۰۰⟩ چقدراست؟ برای یونهای $O^{2-}$ چطور؟ ج) چگالی خطی یون $U^{4+}$ درجهات ⟨۱۱۱⟩ چقدراست؟ برای یونهای $O^{2-}$ چطور؟

جواب: الف) ۲٫۶ × ۱۰$^6$/mm، ۲٫۶ × ۱۰$^6$/mm؛ب) ۱٫۸ × ۱۰$^6$/mm، ۳٫۷ × ۱۰$^6$/mm؛ج) ۱٫۱ × ۱۰$^6$/mm، ۲٫۱ × ۱۰$^6$/mm

**۸ــ۳ــ۴** آیا $MgF_2$ می‌تواند همان ساختار $CaF_2$ را داشته باشد؟ شرح دهید.

۸ــ۴ــ۱ $BaTiO_3$ از تکلیس $BaCO_3$ و تبدیل آن به BaO وسپس مخلوط کردن آن با $TiO_2$ به‌دست می‌آیـد. الف) برای ۱۰۰ گرم محصول چه مقدار BaO و $TiO_2$ لازم است؟ ب) به‌ازای هر گرم‌محصول چه‌مقدار$BaCO_3$ لازم‌است. (Ba = ۱۳۷٫۳۴ amu)

جواب: الف) ۶۵٫۷ g BaO و ۳۴٫۳ g $TiO_2$؛ ب) ۰٫۸۴۶ g $BaCO_3$

۸ــ۴ــ۲ کلسیم تیتانیت ($CaTiO_3$) همان ساختار $BaTiO_3$ را دارد. مکعبی است و چگالی آن ۴ $Mg/m^3$ است. ثابت شبکهٔ آن را حساب کنید.

۸ــ۴ــ۳ چگالی $PbTiO_3$ مکعبی۷٫۵ $Mg/m^3$ است. اندازهٔ سلول واحد شبکه چقدر است؟

جواب: ۰٫۴۰۶ nm (درمقابل ۰٫۳۹۷ nm به‌دست‌آمده ازآزمایش.)

۸ــ۴ــ۴ مقدار اکسیژن موجود در الف) $Fe_3O_4$؛ و ب) $NiFe_2O_4$ را حساب کنید.

☐ ۸ــ۴ــ۵ محلول جامدی حاوی ۳۰ درصد مولی MgO و۷۰ درصد مولی LiF. الف) درصد وزنی $Li^+$، $Mg^{2+}$، $F^-$، $O^{2-}$ چقدراست؟ ب) چگالی‌چقدراست؟

جواب: الف) ۱۶ w/o $Li^+$؛ ۲۴ w/o $Mg^{2+}$؛ ۴۴ w/o $F^-$؛ ۱۶ w/o $O^{2-}$؛ ب) ۳٫۰g/cm$^3$(= ۳٫۰Mg/m$^3$)

☐ ۸ــ۴ــ۶ چه نوعی از تهیجای، آنیون یاکاتیون باید بـا $MgF_2$ همراه باشد تـا در LiF حل‌شود؟ کدام‌یك از آنها باید با LiF همراه باشند تا در $MgF_2$ حل‌شود؟

**۸ــ۴ــ۷** اگریك یون $Ca^{2+}$ به‌ازای هر شش‌یون $Zr^{4+}$ موجود، به‌محلول جامد $ZrO_2$

اضافه شود امکان به‌وجودآمدن شکل‌مکعبی آن وجود دارد. دراین حالت‌کاتیونها ساختار fcc تشکیل می‌دهند، ویونهای $O^{2-}$ درمکانهای چهارگانه جای می‌گیرند. الف) چه‌تعداد یون $O^{2-}$ به‌ازای هر ۱۰۰ کاتیون وجود دارد؟ ب) چه‌کسری ازمکانهای چهارتایی اشغال شده‌اند؟

جواب: الف) یون $O^{2-}$ ۱۸۵٫۷ ب) ۹۲٫۹٪

**۸-۴-۸** الف)عددکوئوردیناسیون $Ba^{2+}$ در $BaTiO_3$ چقدراست؟ب)عددکوئوردیناسیون $Ti^{4+}$ چقدراست؟ ج) چرا یون $O^{2-}$ نمی‌تواندکروی فرض شود؟

**۹-۴-۸** اندازهٔ سلول واحد فرو اسپینل در مثال ۸-۴-۱ برابر ۰٫۸۴ nm است. الف) چگالی آن را حساب‌کنید؛ ب)کمترین فاصلهٔ بین یونهای $O^{2-}$ (مرکز به‌مرکز) چقدراست؟

جواب: الف) ۵٫۳ $Mg/m^3$ ب) ۰٫۲۹۷ nm

**۱۰-۴-۸** ثابت شبکهٔ $a$ در $BaTiO_3$ مکعبی برابر ۰٫۴۰ nm است. بادرنظر گرفتن اینکه $r_{Ti^{4+}}$ = ۰٫۰۶۸nm (پیوست‌ب)،و $r_{Ba^{2+}}$ = ۰٫۱۲۸ nm است،اگر CN = ۱۲ باشد، الف) شعاع $R$ یون $O^{2-}$ در جهات ⟨۱۰۰⟩ چقدراست؟ ب) در جهات ⟨۱۱۰⟩ چطور؟

**۱۱-۴-۸** یك دهم درصد وزنی $Fe_2O_3$ همراه با NiO در محلول جامد موجوداست. دراین حالت ($2Fe^{3+}$ + □) جانشین ۳ $Ni^{2+}$ شده است تا ازجهت بارموازنه شود. چه تعداد تهیجای‌کاتیون درهر $m^3$ وجود دارد؟

**۱-۵-۸** با مراجعه به‌شکل ۸-۵-۲ درجایی‌که $a$ = ۰٫۶۹۳ nm است، چه تعداد اتم سیلیسیم و اکسیژن درهر $m^3$ موجوداست؟

جواب: $2.40 \times 10^{28} Si/m^3$ ، $4.80 \times 10^{28} O/m^3$

**۲-۵-۸** هنگامی‌که‌کوارتز (مثال ۸-۵-۱) به‌چندشکلی $SiO_2$، مطابق باشکل۸-۵-۲، تبدیل می‌شود، انبساط حجمی آن چقدراست؟ (درصورت لزوم از داده‌های مسئلهٔ ۸-۵-۱ استفاده‌کنید.)

**۳-۵-۸** ضریب فشردگی $SiO_2$ درکریستوبالیت چقدر است (شکل ۸-۵-۲)؟ (در صورت لزوم از داده‌های مسئلهٔ ۸-۵-۱ ومثال ۸-۵-۳ استفاده‌کنید.)

جواب: ۰٫۲۹

□ **۴-۵-۸** با استفاده از اطلاعات موجود درمثال۸-۵-۳، اندازهٔ سلول واحد $SiO_2$، $a$، درشکل۸-۵-۲ را معین‌کنید.

**۸-۵-۵** چگالی کوئسیت، چندشکلی $SiO_2$ در فشار بـالا، برابر $Mg/m^3$ ۲٫۹ است. ضریب فشردگی آن چقدراست؟ ($R_O = 0.112\,nm$ ؛ $r_{Si} = 0.038\,nm$)

جواب: ۰٫۳۶

**۸-۵-۶** شیشه‌ای فقط حاوی $Na_2O$ و $SiO_2$ است و ساختاری داردکه درآن ۷۲٪ از اتمهای اکسیژن به‌عنوان پلی بین سیلیسیمهای مجاورعمل می‌کنند بـه‌ازای هر ۱۰۰ اتم اکسیژن چه تعداد اتم سدیم و سیلیسیم وجود دارد؟

**۸-۵-۷** شیشـه‌ای حـاوی $SiO_2$ ۷۵ w/o و $CaO$ ۲۵ w/o است. چـه‌کسری از اکسیژنهای آن به‌عنوان پل بین دواتم سیلیسیم عمل می‌کنند؟

جواب: ۷۰ a/o

**۸-۵-۸** شیشهٔ پنجره‌ای ازنوع شیشهٔ سودا-آهکی با نسبت وزنی$Na_2O$ ۱۴–$CaO$ ۱۲–$SiO_2$ ۷۲ است. چه‌کسری از اتمهای اکسیژن درتشکیل پل شرکت نکرده‌اند؟

**۸-۶-۱** درمثال۸-۶-۲ ذکرشده‌است‌که $Ni^{3+}/Ni^{2+}$ معمولا کمتراز $10^{-4}$ است.اگراکسید نیکل خالص‌این‌نسبت را داشته باشد، درهر$m^3$ چه تعداد حامل بارموجوداست؟ (یادآوری می‌شود که $3Ni^{2+}$ جانشین ($2Ni^{3+} + \square$) می‌شود.)

جواب: $5.5 \times 10^{24}/m^3$

**۸-۶-۲** مقداری $TiO_2$ نااستوکیومتری‌است. ولـی نسبت $Ti^{3+}/Ti^{4+}$ در آن برابر ۰٫۰۰۱ است. الف) این اکسید از نوع $n$ است یا از نوع $p$؟ ب) چگالی $TiO_2$ برابر $Mg/m^3$ ۴٫۲۶ است. درهر $m^3$ چه تعداد حامل وجود داد؟

**۸-۶-۳** پتاسیم‌نیوبات($KNbO_3$) همان ساختار$BaTiO_3$ را دارد، ولی به‌جای $Ba^{2+}$، $K^+$ و به‌جای $Ti^{4+}$، $Nb^{5+}$ قرارگرفته‌است. فرض کنیدکه ابعاد سلول واحد $KNbO_3$ تقریباًمطابق شکل۸-۶-۲ برای $BaTiO_3$ باشد. الف) فاصلهٔ بین مراکز بارهای مثبت و منفی درسلول واحد چقدراست؟ ب) گشتاور دوقطبی سلول واحد، $\mu = Qd$، چقدر است؟ ج) چه قطبشی امکانپذیراست؟

جواب: الف) $0.0117\,nm$ ب) $11.2 \times 10^{-30}\,C \cdot m$ ج) $0.175\,C/m^2$

**۸-۶-۴** با مراجعه به‌مثال ۸-۶-۳، مکعب ده میلی‌متری $BaTiO_3$، ۱٪ فشرده شده‌است. دو انتهایی‌که تحت فشارقرار می‌گیرند به‌طور الکتریکی متصل‌شده‌اند. چه تعدادالکترون از انتهای منفی به‌انتهای مثبت منتقل می‌شوند.

**۸-۶-۵** مدول یانگ بلور پیزوالکتریکی برابر $MPa$ ۸۰۰۰۰ است. برای‌کاهش‌قطبش آن از $C \cdot m/m^3$ ۸۰۰ به ۷۸۸ چه تنشی باید اعمال شود؟

جواب: ۱۲۰۰ MPa

۸ـ۶ـ۶ با مراجعه به‌مثال ۸ـ۶ـ۳، فاصلهٔ بین مراکز بارهای مثبت و منفی هرسلول واحد چقدر است؟

□ ۸ـ۶ـ۷ مادهٔ سرامیکی مغناطیسی نیکل فریت در هرسلول واحد هشت $[NiFe_2O_4]$ دارد کـه مکعبی است و در آن $a =$ ۰٫۸۳۴ nm است. فرض کنید تمام سلولهـای واحد جهتگیری مغناطیسی مشابهی داشته باشند؛ اشباع مغناطیسی آن چقدر است؟ (هر یون $Ni^{2+}$ دومگنتون بوهر دارد.)

□ ۸ـ۶ـ۸ منگنزفریت $[MnFe_2O_4]_8$ دارای همان ساختار مگنتیت $[Fe^{2+}Fe_2^{3+}O_4]$ است، و ثابت شبکهٔ تقریباً یکسانی (۰٫۸۴ nm) دارد. اشباع مغناطیسی آن چقدر است؟ (هر یون $Mn^{2+}$، پنج‌مگنتون بوهر دارد.)

**۸ـ۶ـ۹** با مراجعه به‌مسئلهٔ ۸ـ۶ـ۷، فرض کنید زمانی‌که قسمتی از میدان خارجی ازمیان برداشته شود، قطبیت N–S در ۴۰٪ از سلولهای واحـد، °۱۸۰ بچرخد. چـه مقدار از مغناطش باقی می‌ماند؟

جواب: ۵۰۰۰۰ A/m

□ **۸ـ۶ـ۱۰** با استفاده از بخش ۲ـ۱، تعداد مگنتونهای بوهر، $\beta$، متعلق به‌یونهای دوظرفیتی فـلزات واسطـهٔ: $Ti^{2+}$، $Cr^{2+}$، $Mn^{2+}$، $Fe^{2+}$، $Co^{2+}$، $Ni^{2+}$، و $Cu^{2+}$ را تعیین کنید. تعداد مگنتونهای متعلق به‌کاتیونهای سه‌ظرفیتی $Ti^{3+}$، $Cr^{3+}$، $Mn^{3+}$، $Fe^{3+}$، و $Co^{3+}$ چقدر است؟

□ **۸ـ۶ـ۱۱** بامراجعه به‌مثال ۸ـ۴ـ۱، در این فـرواسپینل مخصوص، یـونهای $Zn^{2+}$ ترجیحاً مکانهای ۴ گانه را انتخاب می‌کنند و $Fe^{3+}$ مربوط به‌آن را به‌مکانهای شش‌گانه می‌رانند. الف) این‌عمل در هرسلول واحد $(Zn_3Ni_5)Fe_{16}O_{32}$ چه‌تعداد مگنتون بوهر به‌وجود می‌آورد؛ ب) اگر تمام یونهای دوظرفیتی در مکانهای شش‌گانه قرار گیرند، چه تعدادی مگنتون در $[NiFe_2O_4]_8$ وجود خواهد داشت؟

جواب: الف) ۴۰ ب) ۱۶

۸ـ۷ـ۱ تحت شرایط معینی، در ساختار نـوع NaCl سیستمهای لغزش $\{100\}\langle 011\rangle$ می‌توانند علاوه بر آنچه‌که درمثال ۸ـ۷ـ۱ ذکر شده‌است عمل کنند. الف) دراین‌مجموعه چه تعداد سیستم لغزش وجود دارد. آنها را ذکر کنید؛ □ ب) بردار لغزش در PbS که ساختار نوع NaCl دارد، در سیستم لغزش فوق چقدر است؟

جواب: الف) ۶ ب) ۰٫۴۳ nm

۸ـ۷ـ۲ در صفحه‌ای شیشه‌ای به‌ضخامت ۲٫۵ mm سوراخ گردی (به‌قطر ۱۲٫۵ mm)

ایجاد شده است. فرض کنید که سطح سوراخ بدون ترك باشد و تنش ۱۰ MPa درجهتی مطابق با شکل ۸-۷-۲ اعمال شود. تمرکز تنش درسطح سوراخ چقدر است؟

**۸-۷-۳** ترکهای مویی به‌عمق ۱ μm که نوکهای آنها ابعاد اتمی دارند در سطح سوراخ مسئلهٔ ۸-۷-۲ تشکیل شده‌اند. تنشهای موجود در نوکهای آنها را برآورد کنید.

جواب: ۳۴۰۰ MPa~

**۸-۷-۴** صفحهٔ شیشه‌ای بزرگی، سوراخی به‌قطر ۱۰ میلی‌متر دارد. الف) ضریب تمرکز تنش حاصل از تنشی کششی که به‌موازات صفحهٔ اعمال شده است، در مجاورت سوراخ چقدر است؟ ب) وقتی سوراخ‌زده شد، ترکهایی به‌عمق ۱۰ μm درکنار سوراخ به‌وجود آمد. اگر مانند مثال ۸-۷-۲ فرض شود که این نوع ترك ابعاد یون اکسیژن را دارد، کل تمرکز تنش به‌وجود آمده چقدر است؟

**۸-۷-۵** میل گردی یك‌میلی‌متری با ترکیب‌شیشهٔ صفحه‌ای (پیوست ج) با ۱ر۰ mm شیشه بوروسیلیکات پوشش داده شده‌است، به‌طوری که میل اکنون ۲ر۱ mm قطر دارد. فرض کنید در ۲۰۰°C تنش اولیه‌ای وجود ندارد، اگر میل مرکب تا ۲۰°C سرد شود، تنش طولی حاصل چقدر است؟

جواب: $\sigma_{\text{شیشهٔ صفحه‌ای}} = +$ ۲۵ MPa، $\sigma_{\text{بوروسیلیکات}} = -$ ۵۵ MPa

**۸-۷-۶** مسئلهٔ‌قبل را با‌عوض کردن جای دوشیشه تکرار کنید. الف) کدامیك تنش بیشتری دارند، شیشهٔ صفحه‌ای یا بوروسیلیکات؟ ب) در مورد استحکام این میل شیشه‌ای مرکب توضیح دهید.

**۸-۷-۷** استحکام مواد بی‌شکل به‌صورت تئوری بین $G/6$ و $G/4$ محاسبه شده است که در آن $G$ مدول برشی‌است. استحکام شیشه را براساس خواص کشسان آن و با استفاده از $\nu =$ ۲۵ر۰ به‌صورت تئوری محاسبه کنید.

جواب: ۵۰۰۰ MPa-۷۰۰۰ MPa

☐ ۸-۸-۱ فرض کنید که سرعت جریان شیشه با ویسکوزیتهٔ $\eta$ نسبت عکس دارد. جریان یافتن شیشهٔ الکتریکی مذاب (مثال ۸-۸-۱) از کورهٔ ۹۲۰°C چقدر سریعتر از کورهٔ ۹۰۰°C است؟

جواب: $\eta_{920}/\eta_{900} =$ ۶۱۸ر۰؛ $\dot{F}_{920} =$ ۶ر۱ $\dot{F}_{900}$

☐ ۸-۸-۲ ویسکوزیتهٔ‌شیشهٔ پنجره‌از $10^6$ Pa . s در ۶۸۰°C به $10^3$ Pa . s در ۱۰۳۵°C افت می‌کند. ویسکوزیتهٔ آن در ۹۰۰°C چقدر است؟

۸-۸-۳ عایقی سرامیکی پس‌از تفجوشی، ۱ v/o تخلخل دارد و باید ۷ر۱۳ mm طول

داشته باشد. درحین ساخت، گردآن می‌تواند تا ۲۴ v/o تخلخل، پرس شود. اندازهٔ قالب چقدر باید باشد؟

جواب: ۱۵٫۰ mm

۸-۸-۴ بعدنهایی فریتی‌مغناطیسی که قطعه‌ای از نوسان نما است باید ۱۵٫۸ mm باشد. انقباض حجمی آن درحین تفجوشی ۱٫۳۳٪ است (براساس تفجوشی نشدهٔ آن). ابعاد اولیه گرد فشرده شدهٔ آن چقدر باید باشد؟

۸-۸-۵ قطعه‌ای از فلز گرد شده پس‌از فشرده شدن و قبل‌از تفجوشی ۲۳٪ تخلخل دارد. اگر تخلخل پس‌از تفجوشی ۲٪ در نظر گرفته شود انقباض خطی مجاز چقدر است؟

جواب: ۸٪ (براساس تفجوشی شده)

۸-۸-۶ آجری پس‌از خشک‌شدن ۳٫۳ کیلوگرم وزن دارد. وقتی بـا آب اشباع می‌شود ۳٫۴۵ کیلوگرم و وقتی در آب غوطه‌ور می‌شود ۱٫۹ کیلوگرم وزن پیدا می‌کند. الف) تخلخل ظاهری آن چقدر است؟ ب) چگالی توده‌ای آن چقدر است؟ ج) چگالی ظاهری آن چقدر است؟

۸-۸-۷ قطعه‌ای از کاشی سرامیکی به‌ابعاد ۲۰۰ mm × ۲۰۰mm × ۵ mm، ۲٫۵g آب جذب می‌کند. تخلخل‌ظاهری کاشی چقدر است؟

جواب: ۱٫۲۵ v/o

۸-۸-۸ آجر عایقی وقتی خشک است ۱٫۷۷ Kg، وقتی با آب اشباع می‌شود ۲٫۲۵ Kg و وقتی درآب غوطه‌ور می‌شود ۱٫۰۵ kg وزن دارد. الف) تخلخل ظاهری آن چقدر است؟ ب) چگالی توده‌ای آن چقدر است؟ ج) چگالی ظاهری آن چقدر است؟

۸-۸-۹ محصولی ازچینی الکتریکی وقتی فروخته می‌شود فقط ۱ v/o تخلخل دارد. پس از پرس و خشک‌کردن کلا ۲۷ v/o تخلخل داشته است. انقباض خطی در حین تفجوشی چقدر است؟

جواب: ۹٫۷ l/o

۸-۸-۱۰ با مراجعه به‌شکل ۸-۸-۳، الف) درحین تفجوشی این گرد از قسمت (الف) تا قسمت (ج) چه‌مقدار انقباض خطی صورت می‌گیرد؟ ب) انقباض حجمی چقدر است؟

# ۹

## مواد چند فاز: نمودارهای فازی

### چشم‌انداز فصل

پس‌از مطالعهٔ مواد تک‌فاز اکنون موادی را کـه شامل دو یا چند فازند بررسی می‌کنیم. درفصل ۹ توجه ما بیشتر به‌نمودارهای تعادلی‌معطوف خواهد شد زیرا اساس مطالعهٔ فصلهای ۱۰ و ۱۱ هستند.

می‌آموزیم کـه چگونه از نمودارهای فازی در مـوارد زیر استفاده کنیم: (۱) پیش‌بینی آنکه‌در آلیاژی با ترکیب‌معین درهردما چه‌فازهایی درحال‌تعادل‌اند، (۲) تعیین ترکیب شیمیایی هرفـاز، و (۳) محاسبهٔ مقادیر هرفـاز مـوجود. برای مهندسان ودانشورزانی که‌موادرا برای‌کاربرد خاصی طراحی می‌کنند نمودارهای تعـادلـی از مهمترین ابزار موجود به‌شمار می‌آیند و برای پیش‌بینی پـایداری مواد به‌هنگام طراحی محصولاتی برای کار در محیطهای مختلف نیز مفیدند.

در تمام این‌فصل فرض براین خواهد بود که تعادل به دست‌آمـده است و واکنش بین فازهای‌موجود ادامه نمی‌یابد.

## هدف از مطالعه

۰۱ تصویر نمودار فازی به‌صورت منحنیهای حد حلالیت، و بنابراین توانایی تعیین آنکه در دمای‌معین برای ترکیب آلیاژی معین چه‌فازی (یا فازهایی) موجود خواهد بود.

۰۲ تعیین ترکیب شیمیایی فاز درحد حلالیت آن.

۰۳ محاسبهٔ مقادیر نسبی دوفاز به‌وسیلهٔ درون‌یابی، هنگامی که حدود حلالیت بیشتر شوند.

۰۴ بررسی کردن آلیاژهای تجارتی مثل برنج، مفرغ، لحیم، نقرهٔ‌استرلینگ و آلومینیم، تحت شرایط تعادل و پیش‌بینی روابط فازی.

۰۵ آشناشدن بـا ویژگیهای ساختاری و ترکیبی فریت ($\alpha$)، استنیت ($\gamma$)، و کاربید ($Fe_3C$).

۰۶ آشنایی کافی با نمودار فازی $Fe-Fe_3C$ به‌طوری که در تعریفات بعدی پیرامون عملیات گرمایی فولادها بتوان‌سریعاً آن را درنظرآورد. این شامل (الف) دما، ترکیب و واکنش اوتکتویید و (ب) حدود حلالیت کربن در $\alpha$ و $\gamma$ می‌شود.

۰۷ بررسی کمی تغییرات فازی، که در حین‌تجزیهٔ‌استنیت(الف)درفولادسادهٔ کربنی ($Fe-C$) یـا (ب) در فولادکـم آلیاژ ساده ($Fe-C-X$) بـا آن برخورد می‌کنیم، دراین‌صورت آشنایی باالگوی نامگذاری AISI-SAE نیز لازم است.

## ۹-۱ روابط کیفی فازها

درسه‌فصل قبلی به‌ترتیب فازهای‌فلزی، آلی، وسرامیکی موردبحث قرار گرفت و بستگی خواص‌این فازها با ساختارآنها مشخص شد. در هریك از فصلهای فوق فقط مواد «تك‌فاز» در نظر گرفته شد. اگرچه بسیاری از مواد مهندسی اساساً از یك‌فاز تشکیل شده‌اند* ولـی بیشتر آنها مخلوطی ازفازهـایند مثلا مـی‌توان فـولاد، لحیم، سیمان پرتلند، چرخهـای سنگ‌زنی، و پلاستیکهای تقویت‌شده را نام برد. مخلوط بودن دو یا چندفاز در ماده سبب واکنشهایی بین فازها می‌شود و خواص حاصل معمولا با خواص تك‌تك فازهـا فرق‌دارد. اغلب این‌خواص را می‌توان با تغییر شکل یا «پراکندگی» فازها بهبود بخشید (فصل ۱۰ را ببینید.)

**محلولها درمقابل مخلوطها.** اجزای‌مختلف می‌توانند به‌صورت محلول یا مخلوط** دریك

---

* برای تعریف فازها به‌آخر بخش ۴-۵ مراجعه‌کنید.

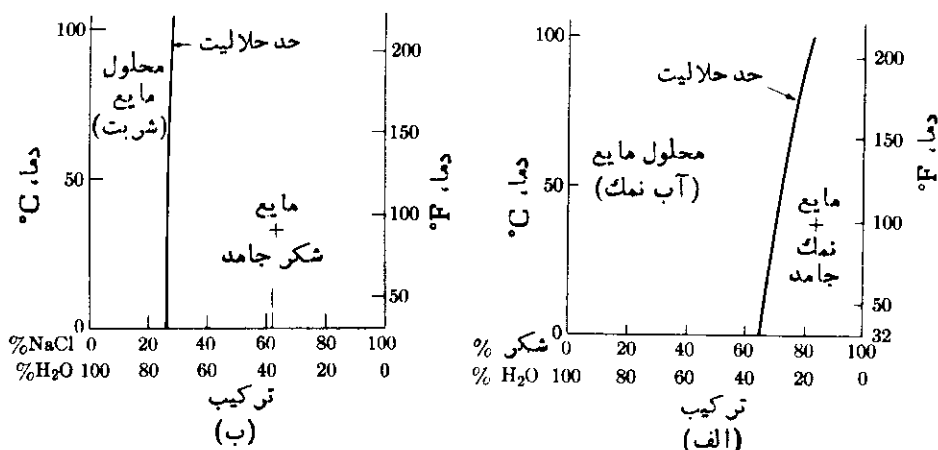
** محلول، فازی با بیش‌از یك‌جزء است؛ مخلوط ماده‌ای با بیش از یك‌فاز است.

ماده وجود داشته باشند. بامحلولهای مایع آشنایی داریم و دربارهٔ محلولهای جامد نیز در بخشهای ۴ـ۲ و ۶ـ۴ و ۸ـ۴ بحث شد. ترکیبات شیمیایی محلولهامی‌تواند بسیار متنوع باشد زیرا (۱) در نقاط مختلف شبکهٔ ساختار فـاز، یك اتم ممکن است جانشین اتم دیگر شود یا (۲) اتمهایی ممکن است بین اتمهای ساختار قرار گیرند. جسم حل شونده الگوی ساختارحلال را عوض نمی‌کند. از طرف دیگر، مخلوط بیش ازیك‌فاز (الگوی ساختاری) دارد. مثلا مخلوطهایی چون ماسه و آب، لاستیك بـا پرکنندهٔ کربن، و تنگستن کاربید بـا چسب کبالت را می‌توان نام برد که در هرکدام دوفاز مختلف وجود دارد وهرفاز آرایش اتمی مخصوص به‌خود را دارد.

البته مخلوط ممکن است از دو محلول مختلف تشکیل شده باشد. مثلا در لحیم قلع ـ سرب یکی از فازها شامل محلول جامدی‌است که درآن قلع به‌جای بعضی از اتمهای سرب درساختار fcc جایگزین شده‌است وفاز دیگرهمان ساختار قلع (راست وجهی مرکزدار) را دارد. در دماهای بالا اتمهای سرب می‌توانند جانشین تعدادی از اتمهای قلع درساختار bct شونـد و بدین‌ترتیب لحیم ۴۰ـ۶۰ معمولی (%۶۰ Sn-%۴۰ Pb) بلافاصله پس‌از انجماد حاوی دوساختار خواهد بود که هرکدام یك‌محلول جامدند.

**حد حلالیت مایع.** شکل ۹ـ۱ـ۱ (الف) حد حلالیت شکر معمولی‌درآب را نشان‌می‌دهد. این منحنی نمودارحلالیت است. تمام ترکیباتی‌که در طرف‌چپ این‌نمودار دیده می‌شوند، فقط شامل یك فازند زیرا تمام شکر درفاز مایع حل می‌شود و شربت به‌وجـود می‌آورد. با افزایش درصد شکر که درسمت راست نمودار دیده می‌شود که دیگر نمی‌توان شکر را به‌طور کامل در شربت حل‌کرد. بنابراین مخلوطی از دوفاز یعنی شکر جامد و شربت‌مایع حاصل می‌شود. این‌مثال تغییرحلالیت را با دما نشان می‌دهد و روش ساده‌ای را برای رسم دما (یاهرمتغیر دیگر) به‌عنوان‌تابعی از ترکیب توصیف می‌کند. محور افقی شکل ۹ـ۱ـ۱ (الف) از چپ به‌راست، درصد شکر را مشخص مـی‌کند و چون مجموع اجزای تشکیل دهندهٔ شکل باید ۱۰۰٪ باشد، درصدآب‌را روی‌همان‌محور از راست به‌چپ‌می‌توان‌خواند.

شکل ۹ـ۱ـ۱ (ب) حـد حلالیت NaCl را در آب نشان مـی‌دهد. مطابق شکل ۹ـ۱ـ۱ (الف)، در اینجا نیز نـاحیه‌ای وجود دارد کـه حاوی محلول مایع است؛ این مایع مخصوص آب‌نمك نـامیده می‌شود. در اینجا حد حلالیتی وجود دارد کـه بـا دما افزایش می‌یابد. آن‌سوی حدحلالیت ناحیهٔ دیگری حاوی مـایع و نمك جامد مـوجود است. شکل ۹ـ۱ـ۲ تصاویر دیگری از سیستم $H_2O$–NaCl را نشان مـی‌دهد. دراینجا در دو انتهـای محـور افقـی $H_2O$ %۱۰۰ (%۰NaCl) و %۳۰ NaCl (%۷۰ $H_2O$) قرار گرفته است. باتوجه به‌شکل دیده‌می‌شودکه (۱) حد حلالیت NaCl در محلول آب نمك باکاهش دما کم می‌شود، (۲) حدحلالیت $H_2O$ در محلول آب‌نمك نیز باکاهش دما پایین‌می‌آید، و (۳) نقطهٔ ذوب ترکیبات میانی ازنقطهٔ ذوب یخ‌خالص (۰°C، ۳۲°F)یا نقطهٔ ذوب‌نمك خالص (۸۰۰٫۴°C) کمتر است. بـا موارد (۱) و (۳) به‌خوبی آشنایی




**شکل ۹-۱-۱** الف) حلالیت شکر در آب. حد حلالیت شکر در آب به‌وسیلهٔ «نمودار حلالیت» نشان داده می‌شود. باید توجه کرد که مجموع شکر و آب در هر نقطهٔ محور افقی ۱۰۰ درصد است؛ ب) حلالیت NaCl در آب.

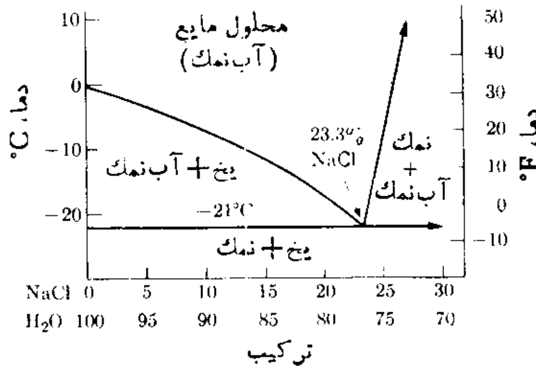
داریم: مورد (۲) که حلالیت محدود یخ درمحلول آبی است و آشنایی کمتری با آن داریم را می‌توان بامثال ساده‌ای شرح داد. محلول نمك و آب مثلا آب‌دریا با NaCl ۷ر۱٪ را تا کمتراز ۰°C (<۳۲°F) سرد می‌کنیم، طبق شکل ۹-۱-۲ این محلول تا وقتی که به‌منهای ۱°C (۳۰ر۲°F) برسد هنوز کاملا به‌صورت مایع است. با مشاهدهٔ هریك از دریاهای نمکدار قطب می‌توان صحت این‌امر را تأیید کرد.* وقتی این آب‌نمك تا زیر ۱°C — سرد می‌شود، بلورهای یخ تشکیل می‌شود و از آنجا که محلول نمی‌تواند در آن دما بیش‌از ۹۸٫۳٪ آب داشته باشد. این بلورهای یخ باید از مایع جدا شوند. در ۲۰°C — (۴°F —) بیشترین مقدار $H_2O$ درمحلول آب‌نمك ۷۷٪ (NaCl ۲۳٪) است. این‌مقدار را می‌توان با تولید برفاب درآن‌دما و جداکردن یخ از این محلول دست‌آورد. یخ تقریباً $H_2O$ خالص خواهد بود و مایع باقیمانده نسبت به‌محلول آب نمك اول، نمك بیشتری خواهد داشت (یعنی $H_2O$ آن کمتر است).

**دما و ترکیب اوتکتیك.** دو منحنی حلالیت شکل ۹-۱-۲ در ۲۱°C — (۶°F —) و در NaCl ۲۳٫۳-$H_2O$ ۷۶٫۷ یکدیگر را قطع می‌کنند. این کمترین دمایی است که در آن محلول آب‌نمك به‌صورت مایع باقی می‌ماند. این دما، دمای اوتکتیك نامیده می‌شود. ترکیب این‌مایع با نقطهٔ ذوب‌پایین، ترکیب اوتکتیك است.

درشکل ۹-۱-۲ مشاهده می‌شود که آب‌نمك زیر هریك ازمنحنیهای حدحلالیت با

---

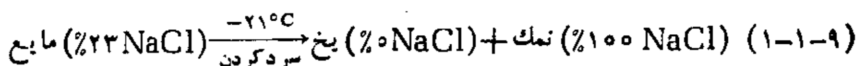
* اگر مقدار نمك دقیقا ۷ر۱٪ نباشد، تغییراندکی به‌وجود می‌آید.




**شکل ۹-۱-۲** حلالیت نمك NaCl در محلول آب‌نمك (خط رو به‌بالا در سمت راست) و حلالیت یخ در آب نمك (منحنی سمت‌چپ).

فاز جامد همراه است. درطرفی کـه $H_2O$ درآن بیشتر است، مخلوط از یخ و آب‌نمك تشکیل شده است؛ درطرف دیگر اوتکتیك، مخلوط حاوی NaCl جامد و آب‌نمك است. زیر دمای اوتکتیك مخلوط دوفاز $H_2O$ جامد (یخ) و NaCl جامد (نمك) وجود دارد.

**واکنشهای اوتکتیك.** آب‌نمکی نمکی باترکیب اوتکتیك ($\sim$۷۷ $H_2O$–۲۳ NaCl) با سرد شدن از دمای اوتکتیك از حالت محلول مایع تنها به‌صورت دو فاز جامد تغییرشکل می‌یابد.



$$\text{مایع}(\%۲۳\,\text{NaCl}) \xrightarrow[\text{سرد کردن}]{-۲۱^\circ C} \text{یخ}(\%۰\,\text{NaCl}) + \text{نمك}(\%۱۰۰\,\text{NaCl}) \quad (۹\text{-}۱\text{-}۱)$$

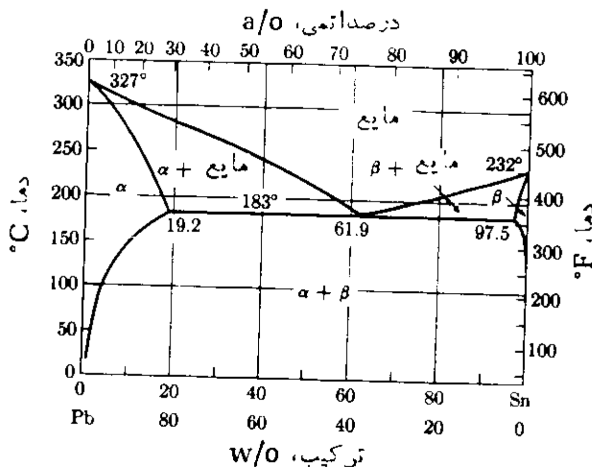
گرم‌کردن‌واکنش راعکس می‌کند. واکنش‌اوتکتیك را می‌توان به‌صورت کلی زیرنوشت



$$L_۲ \underset{\text{گرم کردن}}{\overset{\text{سرد کردن}}{\rightleftharpoons}} S_۱ + S_۲ \qquad (۹\text{-}۱\text{-}۲)$$

که درآن زیرنویسها نمایانگر مقدار بیشتری از یك جزء هستند.

**آلیاژهای اوتکتیك.** در زمانهای قدیم مردم کشف‌کرده بودندکه بـا انتخاب مخلوطهای مناسب از دو یـا چند فلز می‌توان آلیاژهـایی با نقطهٔ ذوب پایین به‌دست آورد. یکی از آلیاژهایی‌که باآن آشنایی داریم لیحم ۴۰–۶۰ معمولی (۶۰ Sn–۴۰ Pb) است. طبق شکل ۹-۱-۳، این آلیاژ دارای ترکیب اوتکتیکی است‌کـه در ۱۸۳°C ذوب می‌شود. این لحیم درمدارهای الکتریکی مصارف بسیار دارد زیرا می‌توان بـا کمینهٔ گرما اتصال فلزی برقرارکرد. اگر لحیم حاوی سرب بیشتری، باشد (مثلا ۸۰ Pb–۲۰ Sn) مـایع در




**شکل ۹ـ۱ـ۳** نمودار Pb_Sn این نمودار ترکیبات فـازی را نشان می‌دهد ومحاسبهٔ مقدار فازها را برای هرمخلوطی ازسرب ـ قلع ، درهردمایی میسرمی‌سازد.

حین سرد شدن در $280°C$ ازسرب اشباع می‌شود. بنابراین در گسترهٔ $100°C$($183°C$ تا $280°C$) مخلوطی ازمایع وجامد وجود خواهد داشت.

**حد حلالیت جامد.** تفاوت شکل ۹ـ۱ـ۳ با شکـل ۹ـ۱ـ۲ درآن است که جامد غنی ازسرب می‌تواند اتمهای قلع را در ساختار خود حل کند. (یخ نمی‌تـواند مقدار قـابل ملاحظه‌ای NaCl درساختاربلوری خودحل کند.) مقدار آن از ۲۹٪ اتم قلع (۱۹درصد وزنـی) درجا غنی ازسرب در $183°C$ تا ۱۰ درصـد اتمی (۶درصد وزنـی) قلع در $300°C$ تغییرمی‌کند. همچنین جامد غنی ازقلع در $183°C$ می‌تواند حاوی ۲٫۵ درصد وزنی (۱٫۵ درصد اتمی) اتم سرب باشد. معمولا این دوفاز جامد را به‌ترتیب با $\alpha$ و$\beta$ نشان می‌دهند.

حد حلالیت‌جامد در دمـای اوتکتیك دارای بیشینه‌ای است. هـم زیروهم بـالای $183°C$، مقدار قلع محلول در جامد $\alpha$ غنی از سرب با ساختار fcc،کاهش می‌یابد. به همین ترتیب حداکثر ۲٫۵ درصد وزنی سرب در جامـد $\beta$ غنی ازقلع بـا ساختار bct، در $183°C$ محلول است.

**نام و نشانهٔ فازها.** در فصلهای ۴ و ۶ اسامی بعضی ازفازهـای «محلول جامد» ذکر شد. برنج، فاز fcc روی در مس است و ونقرهٔ استرلینگ فاز محلول جامد مس درنقره fcc است. بعداً خواهیم دید که فاز آهن bcc که در آن ماده‌ای حل شده باشد، فریت نـامیده می‌شود. همچنین آهن fcc راکه عناصری به‌آن اضافه شده باشد، استنیت می‌نامند.

استفاده ازحروف یونانی به‌جای نام فازها بسیارمتداول است و این به‌خاطر ساده بودن نامگذاری است. بنابراین $\alpha$ و $\beta$ فازهای سیستم Pb-Sn هستند، درحالی که‌سرب وقلع اجزای این سیستم‌اند.* با وجود آنکه $\alpha$ ساختاری مانند سرب خالص دارد ولی فاز $\alpha$ الزاماً سرب خالص نیست.

**مثال ۹-۱-۱** طبق شکل ۹-۱-۱ (الف) شربتی در ۲۰°C(۶۸°F) می‌تواند حاوی۶۷% شکر (۳۳% آب) و در ۱۰۰°C(۲۱۲°F) حاوی ۸۳% شکرباشد. صد گرم شکر و ۲۵ گرم آب را مخلوط کرده و می‌جوشانیم تا تمام شکرحل شود. درخلال سرد شدن مقدارشکر ازحد حلالیت‌تجاوزکرده به‌طوری که (با گذشت‌زمان) شکراضافی‌ازشربت جدا می‌شود. درحال تعادل، نسبت وزنی شربت به‌شکراضافی در ۲۰°C چقدر است؟

حل: مبنا: ۱۰۰ گرم شکر + ۲۵ گرم $H_2O$ = ۱۲۵g

در ۲۰°C

$$\text{مقدار شکردرشربت} + \text{اضافی} = ۰٫۶۷(۱۲۵ - x) + x = ۱۰۰\text{g}$$

$$x = ۴۹٫۲۵\text{g} \ \text{اضافی}$$

$$۱۲۵\text{g} - ۴۹٫۲۵ = ۷۵٫۷۵\text{g} \ \text{شربت}$$

$$\frac{\text{شربت}}{\text{شکراضافی}} = \frac{۷۵٫۷۵\text{g}}{۴۹٫۲۵} = ۱٫۵۴$$

توضیح. در دمای بالاتر تمام شکرحل می‌شود و یک تک فازشربت به وجود می‌آید شکل[۹-۱-۱ (الف)]. وقتی مخلوط سرد می‌شود، حد حلالیت برای‌شربت «۸۰ شکر- ۲۰ آب» در ۸۷°C(۱۸۹°F) خواهد بود. با این حال قبل‌ازاینکه فاز اضافی (در اینجا شکر) شروع به‌جدا شدن کند، قدری فوق سرمایش به‌وجود می‌آید. دراین مورد فوق سرمایش می‌تواند تا دمای اتاق ادامه یابد وآغاز جدا شدن را تا حد قابل ملاحظه‌ای به تأخیر اندازد. درفلزات و دیگر مواد نیزحالات مشابهی از فوق اشباع به‌وجود می‌آید. ▲

**مثال ۹-۱-۲** آب نمکی حاوی ۹% NaCl (۹۱% وزنی $H_2O$) است. چندگرم آب (به ازای ۱۰۰ گرم آب نمک) باید تبخیر شود تا محلول در ۵۰°C به‌صورت اشباع درآید؟

حل: مبنا: ۱۰۰ گرم آب نمک = ۹ گرم NaCl + ۹۱ گرم $H_2O$

ازشکل ۹-۱-۱(ب)، حلالیت NaCl درآب نمک ۲۷%

---

* نشانهٔ $\alpha$ تقریباً برای تمام سیستمها به‌عنوان فاز اول به‌کار می‌رود. ولی این امر مسئله‌ای به‌وجود نمی‌آورد. (همچنان که درمحاسبات جبری مکرراً ازحروف استفاده می‌شود بدون‌آنکه موجب اشتباه در نشانه‌گذاری شود.)

مقدار آب نمک اشباع شده برحسب گرم $= 9g/0.27 = x/0.73$

برای اشباع $x = 24.3 g H_2O$

باید تبخیر شود $91 g - 24.3 g = 66.7 g$

شق دیگر، آن است که مقدار نمک برابر ۲۷٪ آب نمک باقیمانده پس از تبخیر است

$$(0.09)(100 g) = 0.27(100 - y)$$

$$y = 66.7 g$$

توضیح. معمولا ترکیب مایعات و جامدات برحسب درصد وزنی بیان می‌شود مگر آنکه به‌صورت دیگری ذکر شده باشد. ▲

**مثال ۹-۱-۳** آب نمکی با ۴۰ گرم آب و ۱۰ گرم NaCl تا $-10°C$ $(14°F)$ سرد شده است. الف) این آب نمک را در بشر آزمایشگاهی قرار می‌دهیم. چه مقدار نمک می‌تواند در آن حل شود؟ ب) آب نمک ۱۰-۴۰ مشابهی در بشر دوم قرار می‌گیرد. چه مقدار یخ می‌توان به آن اضافه کرد، به‌طوری که از حد حلالیت تجاوز نکند؟

حل: با استفاده از منحنیهای حلالیت شکل ۹-۱-۲

الف) حد حلالیت NaCl در $-10°C$ $= 25\%$

که ۷۵٪ آب به‌جا می‌گذارد

$$(\text{گرم})\ NaCl = 0.25(50 + x) = 10 + x$$

اضافه شده $x = 3.33 g NaCl$

ب) حد حلالیت $H_2O$ در $-10°C$ $= 86\% H_2O$

که ۱۴٪ NaCl به‌جا می‌گذارد

$$(\text{گرم})\ H_2O = 0.86(50 + y) = 40 + y$$

$H_2O$ اضافه شده $y = 21.4 g$ ▲

**مثال ۹-۱-۴** وقتی دما به $-10°C$ $(14°F)$ می‌رسد در خیابانها نمک می‌پاشند. قسمتی از یخ آب می‌شود و آب نمک تشکیل شده با $H_2O$ به‌حالت اشباع در می‌آید. نود گرم از این آب نمک روی ماشین شما ریخته شده است. چند گرم NaCl همراه آن است.

حل: از شکل ۹-۱-۲، حد حلالیت در $-10°C$ برابر $86\% H_2O$ در آب نمک است. مقدار NaCl چنین است

$$0.14(90 g) = 12.6 g\ NaCl$$

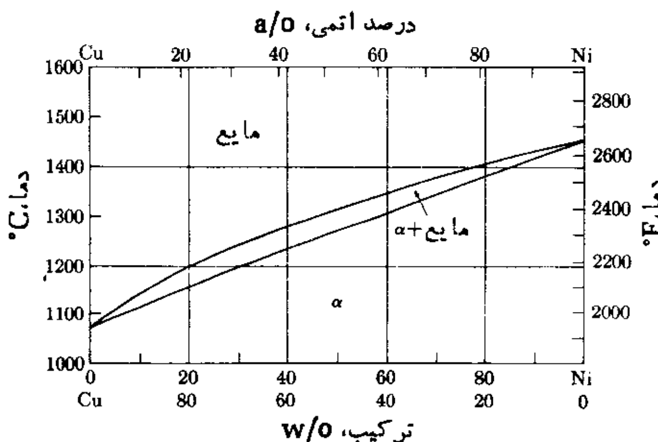
توضیح. به‌خواننده توصیه می‌شود که ازخط‌کش میلی‌متری شفاف‌کوچکی استفاده کند. این‌کارامکان دقیقتر خواندن حدودحلالیت را میسرمی‌سازد. بسیاری ازنمودارهای فازی با دقت ۱٪ ∓ درمقیاسهای بزرگتر رسم‌شده‌اند وسپس‌عکس آنها کوچك شده است. بنابراین دقت محاسبات معمولا به‌دقت درخواندن شکل محدود می‌شود. ▲

## ۹ـ۲ نمودارهای فازی (نمودارهای تعادلی)

شکل ۹ـ۱ـ۳ نمودار فازی سیستم سرب - قلع است. این نمودار همچون «نقشه‌ای» است که درهر ترکیب و دمایی، فازهای موجود را مشخص می‌کند، به‌شرط آنکه آلیاژ درحال تعادل باشد یعنی تمام واکنشهای ممکن‌کامل شده باشد.

مثلا در ۵۰٪ قلع و $100°C$ نمودارفازی وجود دوفازجامد را نشان می‌دهد. یکی $\alpha$که محلول جامد غنی ازسرب است ومقداری قلع درآن حل شده است و دیگری $\beta$که تقریباً قلع خالص با مقدار خیلی‌کمی سرب حل شده درآن است. در$200°C$، آلیاژی با ۱۰٪ قلع و ۹۰٪ سرب‌کاملا درناحیه‌ای واقع می‌شودکه تماماً شامل فاز $\alpha$ است. (این‌فاز، محلول جامد سرب است‌که مقداری قلع درآن حل شده است). در همین دما، ولی با ۳۰٪ قلع و ۷۰٪ سرب، نمودارفازی مخلوط‌دوفازمایع و محلول جامد $\alpha$ را نشان می‌دهد؛اگر این‌آلیاژ تا $300°C$ گرم شود، تماماً مایع خواهد شد.

البته محدودهٔ هرفازدرنمودارهای تعادلی به‌سیستم آلیاژی خاص آن بستگی‌دارد. وقتی مس ونیکل با هم مخلوط می‌شوند نمودار فازی آنها مانند شکل ۹ـ۲ـ۱ خواهد بود. این نمودار فازی، نسبتاً ساده است زیرا فقط شامل دو فاز است. درقسمتهای پایین

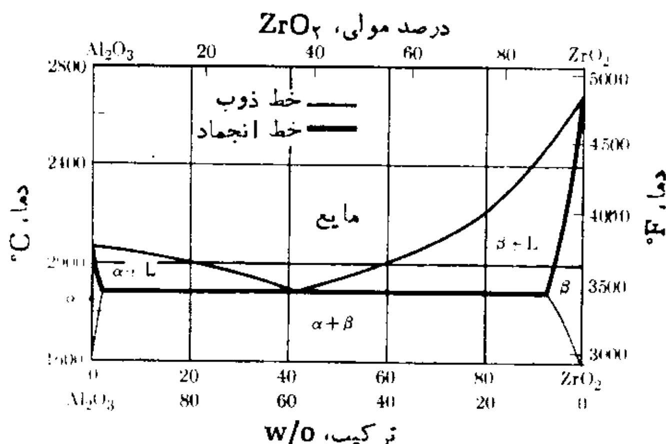



**شکل ۹ـ۲ـ۱** نمودار Cu—Ni. تمام آلیاژهای جامد فقط شامل یك فازند واین فاز fcc است.

این نمودار، تمام تـرکیبات فقط یك محلول جامد وبنابرایـن یك ساختار بلوری تشکیل می‌دهند. مس و نیکل، هردوساختار مکعبی با وجود مرکـزدار دارند. ازآنجاکه انـدازهٔ اتمهای آنها تقریباً یکی است در ۱۰۰۰°C اتمهای مس ونیکـل با هرنسبتی مـی‌توانند جایگزین یکدیگرشوند. هنگامی‌که آلیاژی با ۶۰ درصد مس و ۴۰درصد نیکـل گـرم شود، تا حدود دمای ۱۲۳۵°C (۲۲۵۵°F) فازجامد وجود دارد. ازاین دما تا ۱۲۷۵°C (۲۳۳۰°F) محلولهای جامد و مایع هردو وجود خواهند داشت وبالاتراز ۱۲۷۵°C فقط فاز مایع باقی می‌ماند.

**گستره‌های انجماد.** همان طورکه درنمودارهای قبلی نشان داده شد، گستره دمایی که‌درآن انجماد به‌وقوع می‌پیوندد با ترکیب آن آلیاژ تغییرمی‌کند واگر به‌لحیمی نیازباشد کـه دریك دما به‌طورکامل منجمد نشود این وضعیت موجب می‌شودکه لحیمکار، مثلاً آلیاژغنی ازسربی که به‌عنوان لحیم «پاك‌کننده» به‌کار مـی‌رود، را انتخاب‌کند. اگرلحیم Sn ۲۰– Pb ۸۰ انتخاب شود، گسترهٔ انجماد آن از۲۸۰ تا ۱۸۳ °C خواهد بود حال‌آنکه گسترهٔ انجماد لحیم ۶۰Sn–۴۰Pb فقط از ۱۸۸ تا ۱۸۳°C است.

در این زمینه واژه‌های خط ذوب به‌عنوان مکان هندسی دماهایـی که بالاتر ازآنها تمام ترکیبها مایع‌اند و خط انجماد به‌عنوان مکان هندسی دماهایی که پـایینترازآنها تمام ترکیبات جامدند، به‌کار می‌رود. هرنمودار فازی با دویا چند جزء باید «خط ذوب»، خط انجماد و گسترهٔ انجماد میانی‌را نشان دهند. اجزای ترکیب چه فلزی باشند وچه غیرفلزی

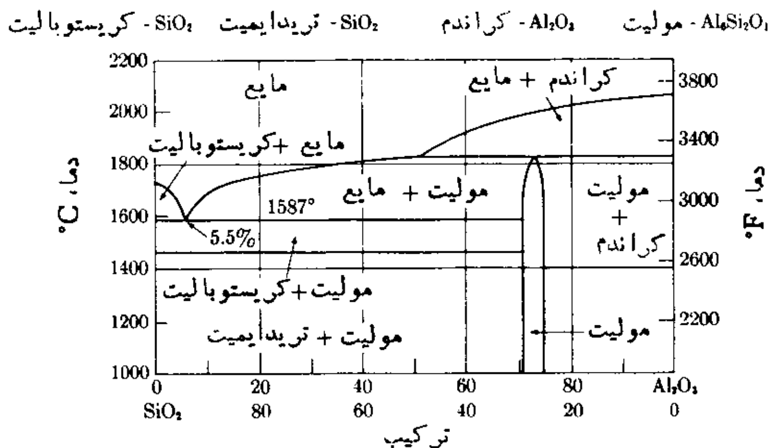



**شکل ۹-۲-۲** نمودار $Al_2O_3$–$ZrO_2$. مانند تمام نمودارهای فـازی خط ذوب حدکمترین دما را برای‌مایع تنها نشان‌می‌دهد. خط انجماد حد بالایی برای مادهٔ کاملا جامد است. گسترهٔ انجماد جامد+مایع بین این دوقرار دارد. این‌دو درنقطهٔ اوتکتیك و جایی‌که تك‌فازها ذوب می‌شوند یکدیگر را قطع می‌کنند.

(شکل ۹ــ۲ــ۲)، درنمودار فازی آنها نقاطی وجود داردکه خط ذوب وخط انجماد یکدیگر را قطع می‌کنند. برای جزء خالص، این نقطه روی لبهٔ نمودار واقع می‌شود. وقتی‌مادهٔ خالص گرم می‌شود، تا رسیدن به‌نقطهٔ ذوب به‌صورت جامد باقی می‌ماند، سپس، قبل‌ازآنکه دما افزایش یابدکاملا به‌مایع تبدیل می‌شود.

خط انجماد و خط ذوب در اوتکتیك یکدیگر را قطع می‌کنند. درشکل ۹ــ۱ــ۳ لحیم مایعی مرکب از ۶۱٫۹% قلع و ۳۸٫۱% سرب پایینتر ازدمای اوتکتیك تماماً جامد و بالاترازآن تماماً مایع است و در دمای او تکتیك سه‌فاز با هم وجود دارند [درسیستم Pb–Sn این سه فاز عبارت‌اند از($\alpha$+مایع+$\beta$)].

**برشهای‌همدما.** اگر روی‌نمودارفازی،خطی‌عرضی‌دریك‌دمای ثابت(به‌نام‌همدما)رسم‌شود، مجموعه‌ای‌ازنواحی ۱و۲ فازی‌را متناوباً نشان می‌دهد. مثلا‌برای نمودار $SiO_2$–$Al_2O_3$ شکل ۹ــ۲ــ۳در $1650°C$ ($3000°F$) این سری به‌صورت ۱ــ۲ــ۱ــ۲ــ۱ــ۲ــ۱ است. درمورد $SiO_2$ خالص فقط یك‌فاز(به‌نام‌کریستوبالیت) وجود دارد ومقدار $Al_2O_3$ درمحلول جامد قابل اغماض است.* بنابراین با افزودن $Al_2O_3$ فاز دوم (مایع) ظاهر خواهد شد. ناحیهٔ دو فازی شامل مایع‌کریستوبالیت است. بین ۴ درصد $Al_2O_3$ (۹۶% $SiO_2$) و ۸درصد $Al_2O_3$(۹۲%$SiO_2$) مایع می‌تواند تمام $SiO_2$ و $Al_2O_3$ موجود




**شکل ۹ــ۲ــ۳** نمودار $SiO_2$–$Al_2O_3$ فازهای‌غیرفلزی به‌همان روش فلزات به‌کار می‌رود. تنها اختلاف آنها این است که درغیرفلزات زمان بیشتری برای رسیدن به تعادل لازم است.

---

* البته حلالیت اندکی وجود دارد ولی آنقدرکم است‌که آن را نمی‌توان روی نمودار فازی نشان داد.

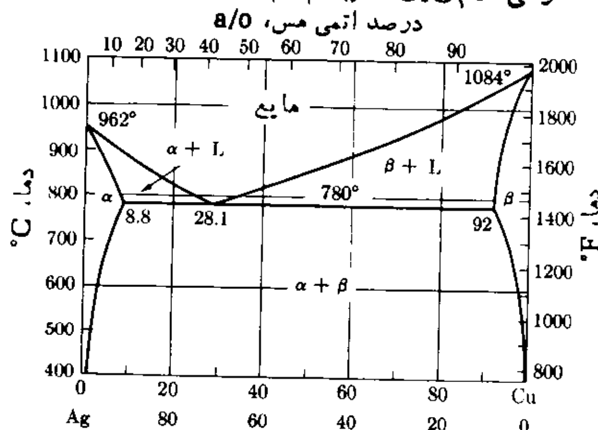
را در خود حل کند بنابراین فقط یك فاز وجود دارد. وقتی بیش از ۸٪ $Al_2O_3$ (کمتر از ۹۲٪ $SiO_2$) وجود داشته باشد، ازحدحلالیت $Al_2O_3$ درمایع فراتر می‌رود و مولیت جامد رسوب می‌کند، دو فاز مایع و مولیت با هم وجود دارند.* گسترهٔ محلول جامد مولیت، از ۷۱٪ $Al_2O_3$ (یعنی ۲۹٪ $SiO_2$) تا ۷۵٪ $Al_2O_3$ (یعنی ۲۵٪ $SiO_2$)است. دراین گستره تنها یك فاز پایداراست؛ زیرا $Al_2O_3$ و $SiO_2$ هردورا دربرمی گیرد. سپس ناحیه‌ای دوفازی‌شامل مولیت وکراندم ($Al_2O_3$) وجوددارد که‌تاخط انتهایی‌سمت‌راست نمودار فازی ادامه می‌یابد. درانتها تنها یك فاز $Al_2O_3$ وجود دارد که‌کراندم نام دارد.

**مثال ۹-۲-۱** نقرهٔ استرلینگ که آلیاژی از ۹۲٫۵٪ نقره و ۷٫۵٪ مس است (شکل ۹-۲-۴) ازدمای محیط تا $1000\,^\circ C$ ($1830\,^\circ F$) به‌آهستگی گرم می‌شود. با ادامهٔ گرمایش چه فازهایی به‌وجود می‌آید؟

جواب:

| | |
|---|---|
| از دمای اتاق تا $760\,^\circ C$ | $\alpha+\beta$ |
| $760\,^\circ C$ تا $800\,^\circ C$ | فقط $\alpha$ |
| $800\,^\circ C$ تا $900\,^\circ C$ | $\alpha+$مایع |
| $900\,^\circ C$ تا $1000\,^\circ C$ | فقط مایع |

**مثال ۹-۲-۲** مخلوطی از ۹۰٪ $SiO_2$ و ۱۰٪ $Al_2O_3$ در $1800\,^\circ C$ ذوب شده‌است و




**شکل ۹-۲-۴** نمودار Ag–Cu.

* اگر مقدار $Al_2O_3$ از ۸ درصد اندکی بیشتر شود، اندکی مولیت نیز وجود خواهد داشت. هنگامی که به‌سمت راست این ناحیه دوفازی نزدیك شویم مقدارکمی مایع باقی خواهد ماند.

سپس بسیار آهسته تا $1400^\circ C$ سرد می‌شود، چه فازی (یا فازهایی) در حین سردکردن به‌وجود می‌آید؟

جواب:

| | |
|---|---|
| از $1800^\circ C$ تا $1700^\circ C$ | فقط مایع |
| $1700^\circ C$ تا $1587^\circ C$ | مایع + مولیت $(Al_6Si_2O_{13})$ |
| $1587^\circ C$ تا $1470^\circ C$ | مولیت + کریستوبالیت $(SiO_2)$ |
| کمتر از $1470^\circ C$ | مولیت + تریدایمیت $(SiO_2)$ |

توضیح. البته باید در $1587^\circ C$ سه‌فاز (مایع + مولیت + کریستو بالیت) وجود داشته باشد،زیرا ماده ازناحیهٔ (مایع + مولیت) به‌ناحیهٔ (کریستوبالیت + مولیت) می‌رود، به‌همین‌ترتیب در $1470^\circ C$ نیز سه فاز وجود دارد.

سردکردن باید بسیار آهسته باشد زیرا فرایند تغییر پیوندهای قوی $Si-O$ ازساختاری به‌ساختار دیگر بسیار کند انجام می‌گیرد.

سیلیس خالص دارای سه‌صورت چندشکلی متداول است: کوارتز در دماهای پایین، وکریستوبالیت و تریدایمیت در دماهای بالا. ▲

**مثال ۹-۲-۳** بامراجعه به‌شکل ۹-۲-۴ برای سیستم Ag–Cu. الف) مکان خط ذوب و خط انجماد را معین‌کنید؛ ب) درمحل تقاطع این دوچند فاز وجود دارد؟

حل:

الف) خط ذوب: $962^\circ$ در $100\%$ Ag تا $780^\circ C$ در ۷۱٫۹% Ag (۲۸٫۱% Cu)، تا $1084^\circ$ در $100\%$ Cu.

خط انجماد: $962^\circ$ در $100\%$ Ag تا $780^\circ C$ در ۹۱٫۲% Ag (۸٫۸% Cu)، باقیمانده در $780^\circ C$ تا ۹۲% Cu (۸% Ag) تا ۱۰۸۴ در $100\%$ Cu.

ب) بایك جزء تنها (فقط Ag یا فقط Cu)، زمانی که دوخط انجماد وذوب یکدیگر را قطع می‌کنند دوفاز وجود دارد.

با دوجزء (Ag و Cu)، درمحل تقاطع خطوط ذوب و انجماد (درنقطهٔ اوتکتیك) سه فاز ($\alpha$ + مایع + $\beta$) وجود دارد.

توضیح. درگسترهٔ دمای بین‌خط انجماد وخط ذوب نمودارفازی دوجزئی یادوتایی، همیشه دوفاز وجود دارد. ▲

**مثال ۹-۲-۴** با مراجعه به‌نمودار Al–Mg (شکل ۹-۵-۴) قانون ۰۰۰-۲-۱-۲-۱ را در الف) $500^\circ C$ و ب) $200^\circ C$ اعمال‌کنید.

جواب:

الف)

| | α | | (α + L) | | Liq | | (L + ε) | | ε | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % Mg | 0 | | 11 | | 29 | | 76 | | 92 | 100 |
| % Al | 100 | | 89 | | 71 | | 24 | | 8 | 0 |

ب)

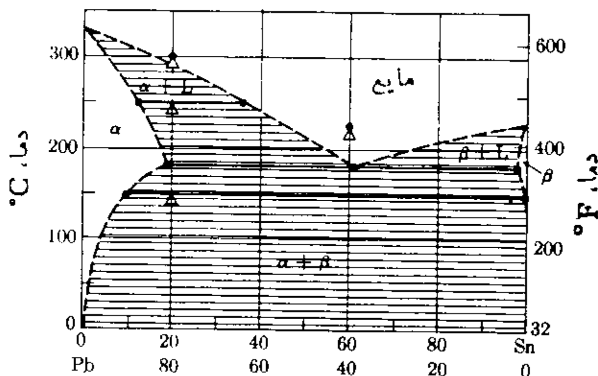
| | α | | (α + β) | | β | | (β + β′) | | β′ | | (β′ + γ) | | γ | | (γ + ε) | | ε | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % Mg | 0 | | 3 | | 35 | | 37 | | ~41 | | ~42 | | 49 | | ~56 | | 96 | 100 |

توضیح. خط‌چینهای موجود روی نمودار فازی بهترین برآورد براساس اطلاعات موجوداست. ▲

## ۹-۳ ترکیب شیمیایی فازها

نمودار فازی علاوه بر اینکه مانند یك «نقشه» مورد استفاده قرارمی‌گیرد. ترکیب شیمیایی فازهایی که‌تحت‌شرایط‌تعادل، پس از کامل‌شدن‌تمام واکنشها، موجودند را نیز نشان‌می‌دهد. این اطلاعات به‌همراه دانستنیهایی در بارهٔ مقدار فازها (بخش۹-۴) برای دانشمندان و مهندسانی‌که با توسعه، انتخاب، وکاربرد مواد درطرح محصولات سروکار دارند بسیار مورد استفاده قرارمی‌گیرد.

**نواحی یك‌فاز.** ترکیب شیمیایی یك تك‌فازخود به‌خود معلوم می‌شود زیرا ترکیب آن همان ترکیب آلیاژ است. همان‌طور که انتظار می‌رود، از آنجا که، مثلا آلیاژ (۶۰ Sn-۴۰ Pb) در$225°C$ (شکل۹-۳-۱) فقط به‌صورت مایع است و ترکیب این




**شکل۹-۳-۱** ترکیب فازها (آلیاژهای Pb_Sn). در $150°C$ آلیاژ ۸۰ Pb_۲۰ Sn شامل $\alpha$ و $\beta$ است. ترکیب شیمیایی $\alpha$ به‌وسیلهٔ منحنی حلالیت مشخص می‌شود. در این دما حد حلالیت برابر با ۱۰% Sn [و۹۰% Pb در فاز $\alpha$(fcc)] است. به‌متن مراجعه‌کنید.

مایع باید همان ۴۰–۶۰ باشد. این موضوع درمورد نواحی دیگر نمودار که حاوی محلول جامد تک‌فازند نیز صادق است.

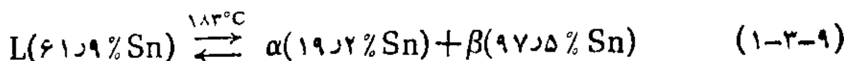
آنچه دراینجا موردبحث قرار می‌گیرد ترکیب شیمیایی فازها (وترکیب کلی آلیاژ) برحسب اجزای تشکیل‌دهندهٔ آن (دراین مورد سرب وقلع) است.

**نواحی دوفازی.** در پاراگراف اول ترکیب شیمیایی دو فاز را بدون ذکردلیل به‌دست می‌آوریم و درپاراگراف دوم به‌شرح دلایل آن می‌پردازیم.

ترکیب شیمیایی دوفاز در دو انتهای منحنی همدمایی‌که درناحیهٔ دوفاز رسم می‌شود قرار دارد. مثلا لحیم $80\ Pb-20\ Sn$ را در $150°C$ درنظر بگیرید. مطابق باشکل ۹–۳–۱، $\alpha$ دارای ترکیب $10\ w/o$ قلع (بنابراین $90\ w/o$ سرب) و ترکیب $\beta$ تقریباً $100\ w/o$ قلع است. همدماهای دیگر شکل ۹–۳–۱، تعیین ترکیب دوفاز را درهرآلیاژ $Sn-Pb$ و درهر دمایی میسرمی‌سازند.

اساس این روش آن است که حد حلالیت قلع در $\alpha$ در $150°C$ برابربا $10\ w/o$ است. چون آلیاژ فوق شامل $20\ w/o$ قلع است، بنابراین $\alpha$ از قلع اشباع شده و قلع اضافی در $\beta$ موجوداست. برعکس چون حد حلالیت سرب در $\beta$ کمتر از $1\ w/o$ است، بنابراین تقریباً تمام سرب موجود باید درفازی غیر از $\beta$ یعنی در $\alpha$ وجود داشته باشد.

**دماهای سه‌فازی و واکنشهای اوتکتیک.** مایعی که دارای ترکیب اوتکتیک است (درمورد سیستم $Pb-Sn$، $61.9\ Sn-38.1\ Pb$) در دمای اوتکتیک ($183°C$) به‌دو فاز جامد ($\alpha$ و $\beta$) تجزیه می‌شود. بنابراین دراین دما فقط سه‌فاز می‌توانند درتعادل باشند. هرگاه چنین آلیاژی گرم شود، دوفاز جامد این لحیم ذوب می‌شود و یک‌فاز مایع تشکیل می‌شود. این واکنش دوطرفه را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد



$$L(61.9\%\,Sn) \underset{}{\overset{183°C}{\rightleftarrows}} \alpha(19.2\%\,Sn)+\beta(97.5\%\,Sn) \qquad (۹–۳–۱)$$

دراین رابطه ترکیب سه‌فازی که در $183°C$ در حال تعادل‌اند، برحسب قلع بیان شده است.*

واکنش رابطهٔ (۹–۳–۱) که شامل یک مایع و دوجامداست واکنش اوتکتیک نام دارد و صورت کلی آن (که قبلا ارائه شد) چنین است



$$L_2 \underset{\text{گرم کردن}}{\overset{\text{سرد کردن}}{\rightleftarrows}} S_1+S_3 \qquad (۹–۱–۲)$$

در رابطهٔ فوق اعداد ۱ و ۲ و ۳ مقدار یکی ازدوجزء را به‌ترتیب صعودی نشان می‌دهد.

---

* به‌جای نوشتن مقدارقلع می‌توان مقدار سرب یعنی $38.1\%\ Pb$، $80.8\%\ Pb$ و $2.5\%\ Pb$ را به‌ترتیب برای $L$، $\alpha$ و $\beta$ نوشت.

**مثال ۹-۳-۱** درسیستم Cu–Ni (شکل ۹-۲-۱) در $1300^\circ C$، الف) حد حلالیت مس درجامد $\alpha$ چقدر است؟ ب) حد حلالیت نیکل درمایع چقدر است؟ ج) ترکیب شیمیایی فازها را درآلیاژ ۴۵ Cu–۵۵ Ni، در $1300^\circ C$ معین کنید.

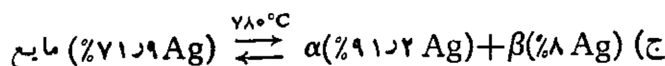
جواب: الف) w/o ۴۲ Cu؛ ب) w/o ۴۵ Ni؛ ج) (۴۲ Cu–۵۸ Ni): $\alpha$؛ (۵۵ Cu–۴۵ Ni): L.

توضیح. حد حلالیت است که ترکیب شیمیایی فازها را درناحیهٔ دوفاز معین می‌کند.
▲

**مثال ۹-۳-۲** آلیاژی از ۴۰ Ag–۶۰ Cu (شکل ۹-۲-۴) به‌آهستگی از $1000^\circ C$ تا دمای اتاق سرد می‌شود. الف) چه فازهایی درحین سرد شدن حاصل می‌شوند؟ ب) ترکیب این فازها چیست؟ ج) واکنش اوتکتیك آن را بنویسید.

جواب: الف) و ب)

| دما | $\alpha$ | مایع | $\beta$ |
|---|---|---|---|
| $1000^\circ C$ | — | ۶۰ Cu–۴۰ Ag | — |
| ۸۰۰ | — | ۳۴ Cu–۶۶ Ag | ۹۲ Cu–۸ Ag |
| ۷۸۰ | ۹۱٫۲ Ag–۸٫۸ Cu | ۲۸٫۱ Cu–۷۱٫۹ Ag | ۹۲ Cu–۸ Ag |
| ۶۰۰ | ۹۶٫۵ Ag–۳٫۵ Cu | — | ۹۸ Cu–۲ Ag |
| ۴۰۰ | ۹۹ Ag–۱ Cu | — | ۹۸ Cu–۲ Ag |
| ۲ (برون‌یابی‌شده) | تقریباً ۱۰۰ Ag | — | تقریباً ۱۰۰ Cu |


ج) $\alpha(\%91.2\ Ag)+\beta(\%8\ Ag) \overset{780^\circ C}{\rightleftarrows}$ مایع $(\%71.9\ Ag)$

توضیح. در تقریباً $890^\circ C$ مایع ازمس اشباع می‌شود. ترکیب اولین ذرات $\beta$ که دراین دما جدا می‌شود ۷ Ag–۹۳ Cu است.
▲

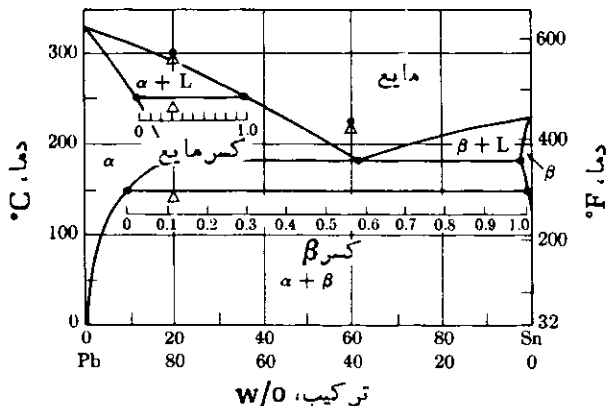
## ۹-۴ کمیت فازها

علاوه بر (۱) تعیین فازهای پایدار یا تعادلی (بخش ۹-۲) و (۲) به‌دست‌آوردن ترکیب شیمیایی آنها از روی نمودارهای فازی (بخش ۹-۳)، می‌توانیم (۳) کمیت فازهایی را که در شرایط تعادل وجود دارند معین کنیم. این امر درفصل ۱۰ که از خواص مواد چند فاز صحبت می‌شود مفید خواهد بود.

**نواحی یك‌فاز.** باردیگر چنانکه در بخش ۹ــ۳ گفته شد مقادیر فازها به‌طور خودکار تعیین می‌شوند. مثلا ۲۲۵ گرم از آلیاژ Sn ۲۰–Pb ۸۰ در ۳۰۰°C فقط مایع است و مقدار آن‌هم ۲۲۵ گرم‌است. به‌عبارت دیگر می‌توان گفت‌که تمام (یا ۱۰۰٪) آلیاژمایع‌است و دراین‌حال لازم نیست‌که وزن دقیق آلیاژموجود ذکرشود.

**نواحی دوفاز.** مقادیر فازهایی راکه در نواحی دوفازی نمودارها وجود دارند (یا کسر مقدارآنها) ابتدا بدون توجه به‌دلایل آن به‌دست‌می‌آوریم. ودرپاراگراف بعد دلایل‌منطقی آن ذکر می‌شود. مقادیر دوفاز موجود با درون‌یابی ترکیب آلیاژ بین ترکیب دوفاز به‌دست می‌آیسد. برای روشن شدن مطلب دوباره لحیم Sn ۲۰–Pb ۸۰ را در ۱۵۰°C در نظر بگیرید. بنابر شکل ۹ــ۴ــ۱، ترکیب شیمیایی آلیاژ دراین دمـا (Sn ۲۰–Pb ۸۰) در نقطه‌ای به‌فاصلهٔ ۱۱ر۰، بین‌ترکیب α (یعنی Sn ۱۰–Pb ۹۰) وترکیب β (Sn ۱۰۰~ و Pb ۱ <) واقع‌است. بنابراین در ۱۵۰°C کسرمقدار β برابر با ۱۱ر۰ (وکسرمقدار α برابر با ۸۹ر۰) ازکل مقدار لحیم است.* می‌توان این مقادیر را به‌صورت α ۸۹٪ و β ۱۱٪ نیز گزارش کرد.

به‌عنوان مثال دیگر همین‌آلیاژ را در ۲۵۰°C درنظر بگیرید. بنابر شکل ۹ــ۴ــ۱ دوفاز α(Sn ۱۲–Pb ۸۸) و L(Sn ۳۶–Pb ۶۴) وجود دارند. ترکیب کلی این‌آلیاژ که Sn ۲۰–Pb ۸۰ است به‌فاصلهٔ ۱/۳ بین ترکیب شیمیایی α و ترکیب شیمیایی مایع




**شکل ۹ــ۴ــ۱** کمیت فازها (در آلیاژهای Pb–Sn). همان‌طورکـه در شکل ۹ــ۳ــ۱ دیدیم آلیاژ Sn ۲۰–Pb ۸۰ در ۱۵۰°C دارای دو فاز α و β است. بـادرون‌یابی‌کسر β برابر ۱۱ر۰ می‌شود. همین‌آلیاژ در ۲۵۰°C شامل ۳۳ر۰ مایع (و α ۶۷ر۰) است. بـه‌متن مراجعه کنید.

* درنتیجه، اگر ۲۲۵ گرم لحیم موجود باشد، تقریبـاً ۲۰۰ گرم از α و ۲۵ گرم از β وجود خواهد داشت.

قرار دارد. بنا براین در $250^{\circ}C$ کسر مقدار مایع برابر ۱/۳ و کسر مقدار $\alpha$ برابر ۲/۳ مقدار کل آلیاژ است.

باید توجه کرد که مقادیر فوق برحسب فازها بیان شده‌اند ـ یعنی $\alpha$ و $\beta$ یا $\alpha$ و L. حال آنکه ترکیب شیمیایی برحسب اجزاء بیان شد یعنی Sn و Pb.

برای پیروی از روش ذکرشده مقیاس (طول) قابل تغییری لازم است زیرا طول همدمای بین دومنحنی حد حلالیت، پیوسته تغییر می‌کند. درون‌یابی با استفاده از خط‌کش میلی‌متری نیز میسر است.* همچنین می‌توان به‌تقسیم بندیهای روی محور افقی توجه کرده این مقادیر را به‌دست آورد.

**موازنهٔ مواد.** دلیل اساسی روش درون‌یابی فوق، از موازنهٔ مواد ناشی می‌شود به‌عبارت دیگر کل برابر با مجموع قسمتهاست. در مثال بالا در $250^{\circ}C$، مقدار سرب در کل آلیاژ برابر است با مقدار سرب در $\alpha$ به‌اضافهٔ مقدار سرب درمایع.

فرض کنید در $250^{\circ}C$، ۶۰۰ گرم لحیم ۸۰ Pb–۲۰ Sn داشته باشیم، یعنی ۴۸۰ گرم سرب (و ۱۲۰ گرم قلع). در این‌صورت $A$ گرم $\alpha$(۸۸ Pb–۱۲ Sn) و $L$ گرم مایع (۶۴Pb–۳۶ Sn) وجود دارد که ترکیب آنها درشکلهای ۹–۳–۱ و ۹–۴–۱ دیده می‌شود. بدیهی است که

$$A+L=600 \text{ گرم}$$

براساس ترکیب شیمیایی دوفاز و ترکیب کلی آلیاژ، موازنهٔ سرب به‌صورت زیر در می‌آید

$$0.88\,A+0.64\,L=0.80(A+L) \qquad (۹–۴–۱)$$

یا دراین مورد $A=2L$ یعنی ۲۰۰ گرم مایع و ۴۰۰ گرم $\alpha$، به‌عبارت دیگر همان مقادیر ۱/۳ و ۲/۳ که در بالا به‌دست آوردیم.

رابطهٔ (۹–۴–۱) را می‌توان به‌صورت کلی زیرنوشت

$$C_x(X)+C_y(Y)=C(X+Y) \qquad (۹–۴–۲)$$

به‌طوری که $C_x$ و $C_y$ به‌ترتیب ترکیب شیمیایی فازهای $x$ و $y$ هستند. $C$ ترکیب کل آلیاژ است. $X$ و $Y$ مقادیر فازهای $x$ و $y$ هستند. رابطهٔ جبری (۹–۴–۲) را می‌توان به‌یکی از دوصورت زیر نوشت

$$\frac{X}{X+Y}=\frac{C_y-C}{C_y-C_x} \qquad (۹–۴–۳، الف)$$

یا

* توصیه می‌شود ازخط‌کش میلی‌متری شفاف کوچکی استفاده شود.

$$\frac{X}{X+Y}=\frac{C_x-C}{C_x-C_y} \qquad \text{(۹-۴-۳، ب)}$$

مقدار $X/X+Y$ کسر مقدار $x$، و $Y/x+y$ برابر کسرمقدار $y$ است. رابطهٔ (۹-۴-۳) قانون اهرم معکوس است که معمولا در کتابهای مواد برای محاسبه کسر مقدار فازها به‌کار می‌رود.*

□ **حالت خاص سه‌فازی.** لحیمهای سرب-قلع هنگامی‌که در $183°C$ یعنی در دمای اوتکتیك، به‌حال تعادل درآیند شامل سه‌فاز خواهند بود. دراین‌حالت خاص محاسبهٔ دقیق کسرمقادیر $\alpha$ و $\beta$ ومایع موجود، میسر نیست. در $182°C$ می‌توان محاسبه‌کرد که آلیاژ ۷۰ Pb-۳۰ Sn شامل $\alpha$ ۸۶ر۰ و $(\%14\beta)$ است. همچنین محاسبات در $184°C$ وجود ۱/۴ مایع (و $\%75\,\alpha$) را ثابت می‌کند. درطی گرم‌کردن در دمای اوتکتیك، بین ۱۸۲ و $184°C$، تمام $\beta$ و مقداری از $\alpha$ باهم ترکیب شده و مایع اوتکتیك را به‌وجود می‌آورند. در عمل، از ۱۰۰۰ گرم لحیم، ۱۱۰ گرم $\alpha$ (یعنی ۸۶۰ g-۷۵۰ g) و ۱۴۰ گرم $\beta$ مصرف‌می‌شود تا ۲۵۰ گرم مایع اوتکتیك (۶۱ر۹ Pb-۳۸ر۱ Sn) حاصل شود. بنابراین باوجود سه‌فاز در $183°C$ فقط می‌توان گفت که مقدار $\alpha$ بین ۸۶۰ تا ۷۵۰ گرم، مقدار $\beta$ بین ۱۴۰ تا صفر گرم و مقدار مایع بین‌صفر تا ۲۵۰ گرم است.**

**مثال ۹-۴-۱** مفرغ ۹۰ Cu-۱۰ Sn را درنظر بگیرید. الف) چه‌فازهایی در $300°C$ وجود دارد؟ ترکیب شیمیایی آنها چیست؟ کسر هر کدام چقدر است؟ ب) در $600°C$ چطور؟ ج) درچه دمایی ۱/۳ مایع وجود دارد؟ درچه‌دمایی ۲/۳ مایع موجود است؟

حل: با استفاده از شکل ۹-۵-۲

الف) $\alpha$: ۹۳ Cu-۷ Sn $\quad \frac{۳۷-۱۰}{۳۷-۷}=$ ۹ر۰

$\epsilon$: ۶۳ Cu-۳۷ Sn $\quad \frac{۱۰-۷}{۳۷-۷}=$ ۱ر۰

ب) $\alpha$: ۹۰ Cu-۱۰ Sn $\qquad$ ۰ر۱

---

* می‌توانید از این‌قانون اهرم برای محاسبهٔ کسر مقدار فازها استفاده‌کنید، اگر ساده‌تر باشد از درون‌یابی طبق شکل ۹-۴-۱ می‌توان استفاده‌کرد. اگر ازمحور افقی برای درون‌یابی استفاده می‌کنید، رابطهٔ (۹-۴-۳) به‌طور غیرمستقیم استفاده‌می‌شود. درهر صورت درنظرداشته باشید که‌ترکیب شیمیایی آلیاژ در «مرکز ثقل» بین ترکیب شیمیایی دوفاز مربوط به‌آن قرار دارد. این‌تکیه‌گاه‌اهرم‌است؛ فازی‌که مقدار آن‌بیشتر است روی بازوی‌کوتاهتر اهرم‌قرار دارد.

** این‌حالت خاص سه‌فاز برای سیستم دوجزئی‌مورد مشابهی درسیستم‌یك‌جزئی دارد. مثلا در مورد $H_2O$ در $0°C$ $(32°F)$، محاسبهٔ کسر مقدار یخ و کسرمقدار آب مایع امکانپذیر نیست.

ج) با استفاده از مقیاس میلی‌متری: L ۱/۳ در $900\ ^\circ C$ و L ۲/۳ در $975\ ^\circ C$. ▲

**مثال ۹-۴-۲** برای ۷۵ گرم آلیاژ ۷۰ Pb-۳۰ Sn در $182\ ^\circ C$ موازنهٔ مواد را براساس مقدار سرب انجام دهید و $A$، مقدار $\alpha$، و $B$، مقدار $\beta$، را حساب کنید.

حل: با استفاده از معادلهٔ (۹-۴-۲) و محاسبهٔ مقدار سرب درشکل ۹-۱-۳

$$0.808\,A + 0.025\,B = 0.70\,(A+B)$$

$$A+B = 75\ \text{گرم}$$

با حل این‌دو رابطه

$$A = 64.7\ \text{g}, \qquad B = 10.3\ \text{g}$$

$$\frac{A}{A+B} = 0.86 \qquad \frac{B}{A+B} = 0.14$$

توضیح. اگر موازنه‌براساس قلع انجام گیرد

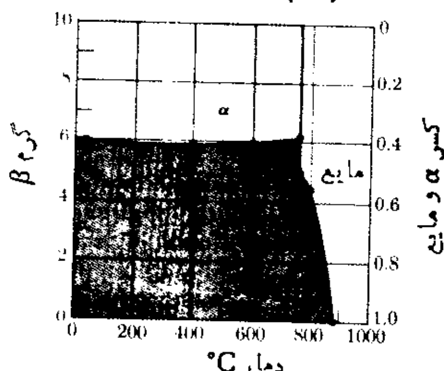
$$[0.192\,A + 0.975\,B = 0.30\,(A+B)]$$

همین نتیجه را خواهد داد. ▲

**مثال ۹-۴-۳** برای ۱۰ گرم از آلیاژ ۴۰ Ag-۶۰ Cu (شکل ۹-۲-۲) مقدار $\beta$ را به‌صورت تابعی از دما رسم کنید.

حل: قبلا ترکیب‌شیمیایی فازها در مثال ۹-۳-۲ تعیین شد. از $890\ ^\circ C$ به‌بالا تمام آلیاژ مایع و مقدار $\beta$ صفر است. با درون‌یابی خواهیم داشت

| | |
|---|---|
| در $800\ ^\circ C$ | $0.45\ (10\ \text{g}) = 4.5\ \text{g}$ |
| $780^\circ +$ | $0.50(10) = 5.0$ |
| $780^\circ -$ | $0.615(10) = 6.15$ |
| $600^\circ$ | $0.60(10) = 6.0$ |




**شکل ۹-۴-۲** مقدار فازها (۱۰ گرم آلیاژ ۴۰ Ag-۶۰ Cu) مقدار $\beta$ به‌وسیلهٔ درون‌یابی تعیین شده است (مثال ۹-۴-۳).

| | |
|---|---|
| ۴۰۰ ° | ۰٫۵۹۵(۱۰) = ۵٫۹۵ |
| ۲۰ ° | ۰٫۶۰(۱۰) = ۶٫۰ |

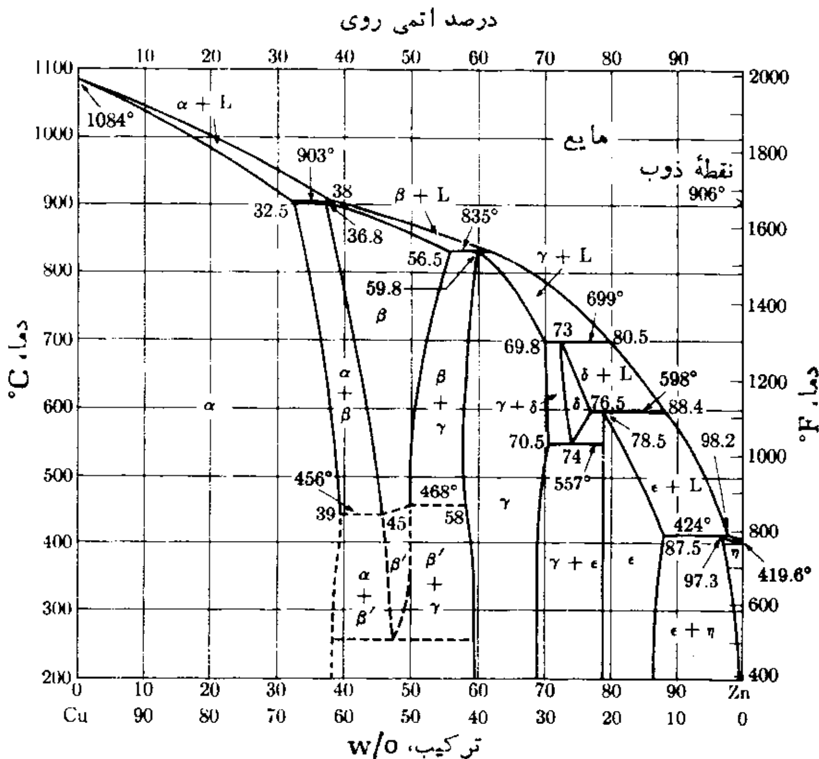
تابع آن به‌صورت ناحیهٔ تیرهٔ سایه زده‌شده در شکل ۹ـ۴ـ۲ دیده می‌شود.

توضیح. مقادیر $\alpha$ و مایع (یا کسر مقدار آنها) را نیز مـی‌توان در شکل ۹ـ۴ـ۲ نشان داد زیرا جمع فازها درهر دمایی‌برابر ۱۰٫۰ گرم است این‌کار را باسایه‌زدن‌انجام داده‌ایم.

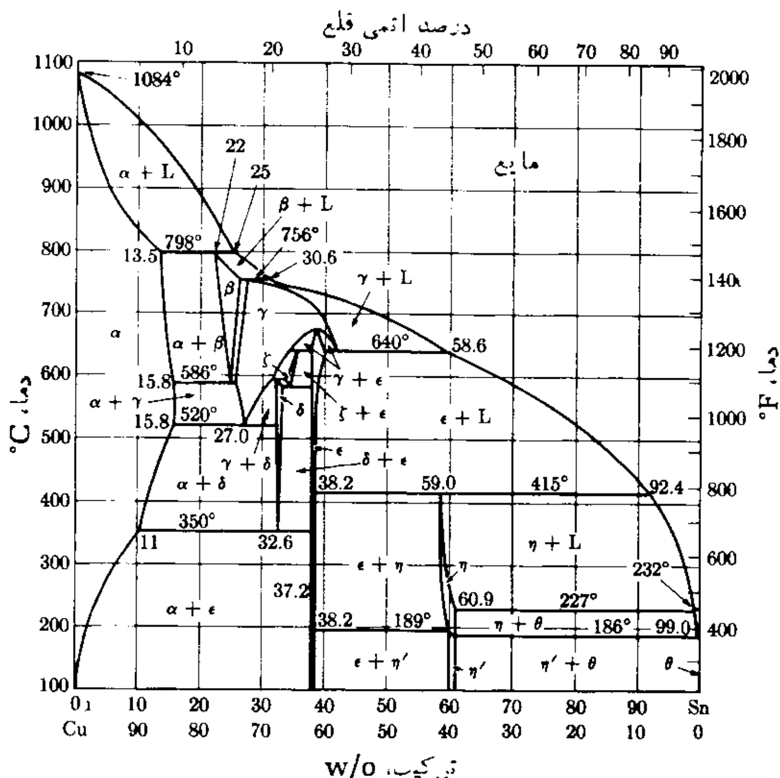
به‌ناپیوستگی منحنی در ۷۸۰ °C (دمای اوتکتیك) تـوجه کنید، این حالت خاصی است که سه‌فاز به‌طور همزمان موجودند.

## ۹ـ۵ آلیاژهای تجارتی و سرامیکها

شایان ذکر است که بیشتر آلیاژهای تجارتی درقسمتهای ساده‌تر نمودارهای فازی‌واقع‌اند. مثلا ترکیب بیشتر آلیاژهای برنج درناحیهٔ تك‌فاز $\alpha$ درشکل ۹ـ۵ـ۱ واقع است. همچنین




شکل ۹ـ۵ـ۱ نمودار Cu_Zn.

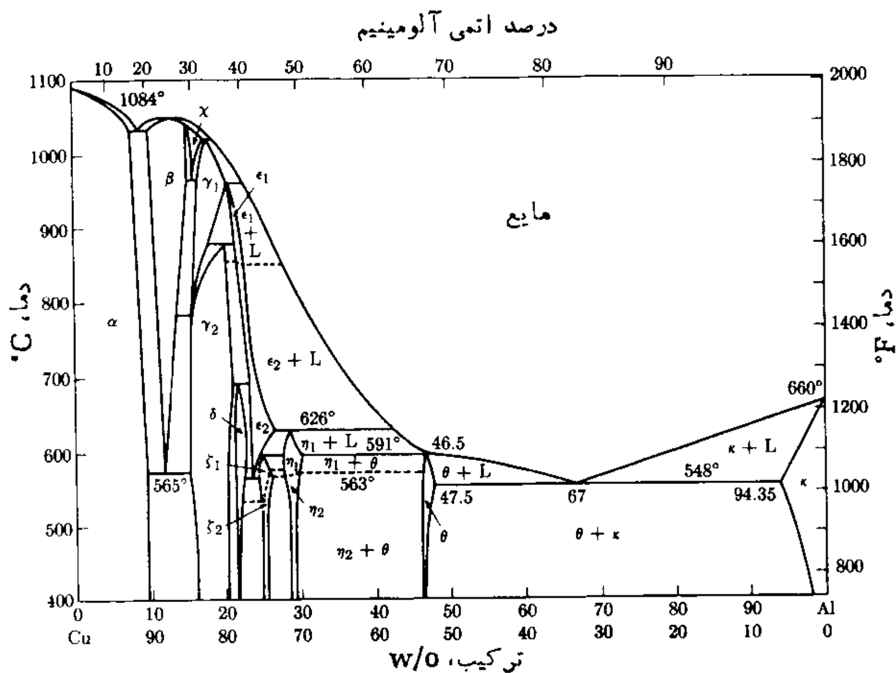



**شکل۹ـ۵ـ۲** نمودار Cu–Sn.

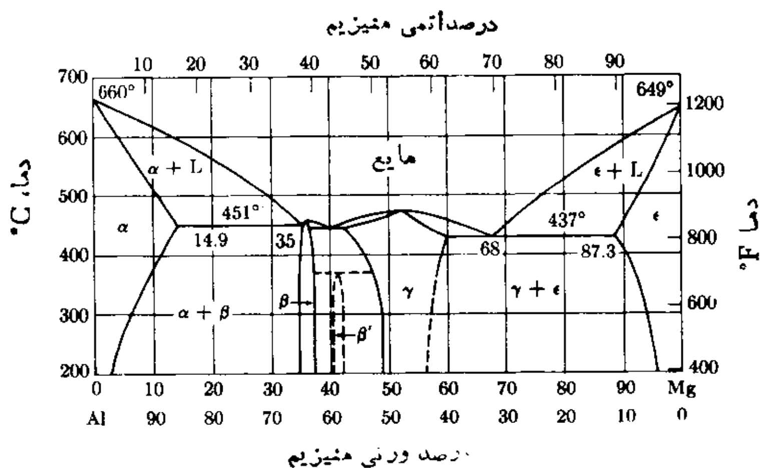
مفرغهـای معمولی کمتراز ۱۰٪ قلع دارند. در سیستم Cu–Sn (شکل ۹ـ۵ـ۲) از نظر تجارتی به‌ناحیه‌هایی‌که ظاهر پیچیده‌تری‌دارد‌توجه‌کمتری می‌شود.* درفصل ۱۱ آلیاژهایی مـانـنـد Cu ۵–Al ۹۵، Mg ۱۰–Al ۹۰، Al ۱۰–Mg ۹۰، (شکلهـای ۹ـ۵ـ۳ و ۹ـ۵ـ۴) را بررسی می کنیم زیرا هر کدام از آنها در دماهای بالا تك‌فازند. ولی درحین سردشدن از منحنی حدحلالیت می گذرند. با کنترل کردن سرعت جداشدن فازدوم می‌توان استحکام آلیاژ را تا حدود زیادی افزایش داد و این در کارهای مهندسی بسیار با ارزش است (فصل۱۱). سیستم Al–Si (شکل ۹ـ۵ـ۸) اساس خالص کردن نیمرساناها و مواد مربوط به‌آنها را ازنظر تجارتی فراهم می‌سازد (مثال ۹ـ۵ـ۱).

در دو بخش بعدبه‌دو دلیل به‌نمودار فازی $Fe–Fe_3C$ خواهیم پرداخت. اولا فولاد آلیاژی از آهن و کربن است که درهرجامعه صنعتی‌اهمیت بسیار دارد ثانیاً فولادهـا در

* باوجود ظاهر پیچیده، تمام نواحی یك‌فازی و یا دوفازی‌اند و بنابرروشهایی که قبلا گفته شد برای هرآلیاژی می‌توان فازها، ترکیب شیمیایی آنها و مقدار هریك را محاسبه کرد.




**شکل۹ـ۵ـ۳ نمودار Al–Cu.**



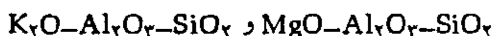

**شکل۹ـ۵ـ۴ نمودار Al–Mg.**

روشهای عملیات گرمایی به‌عنوان الگو مطرح‌اند. تنها با آگاهی از نمودار فازی است که می‌توان عملیات گرمایی مناسب و میکروساختار مطلوب (و در نتیجه خواص مطلوب) را طراحی کرد.

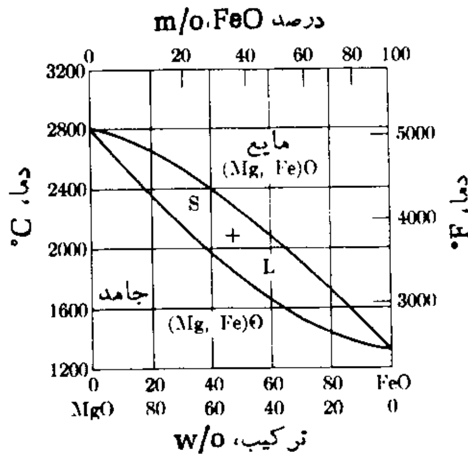
متخصصان سرامیك نیز مانند متخصصان متالورژی از نمودارهای فازی استفاده می‌کنند. با وجود این در این کتاب فقط پنج نمودار از مواد سرامیکی بررسی خواهد شد: $Al_2O_3$–$SiO_2$ (شکل ۹–۲–۲)، $Al_2O_3$–$ZrO_2$ (شکل ۹–۲–۳)، Fe–O (شکل ۹–۵–۵)، FeO–MgO (شکل ۹–۵–۶)، و $BaTiO_3$–$CaTiO_3$ (شکل ۹–۵–۷).*

**شکل ۹–۵–۵** نمودار Fe–O.

* محصولات سرامیکی حاوی سه‌جزء یا بیشترند. مثلا

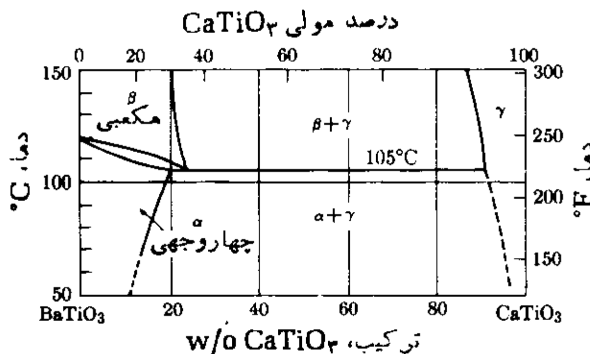

$K_2O$–$Al_2O_3$–$SiO_2$ و $MgO$–$Al_2O_3$–$SiO_2$

در چینیهایی که‌مصارف الکتریکی دارند. باوجودآنکه‌نمودارهای سه‌تایی فازها که‌پیچیده‌ترند، اهمیت زیادی دارند، در این کتاب آنها را بررسی نخواهیم کرد.




**شکل ۹–۵–۶** نمودار MgO–FeO. با نمودار Cu–Ni قابل مقایسه است. (شکل ۹–۲–۱) فازهای جامد و مایع هردو بطور کامل حلالیت دارند ساختار محلول جامد FeO–MgO درشکل ۴–۳–۱ نشان داده شده است.

اولی شامل مواد نسوز است. یعنی: اکسیدهای با نقطهٔ ذوب بالاکه دمای اوتکتیک آنها کمی کمتراز ۲۰۰۰°C است. دومی، $Al_2O_3$–$SiO_2$ به‌سرامیکهایی که زمینهٔ رسی‌دارند تعلق دارد خاکهای رس با کیفیت بهتر، پس‌از انجام فرایند روی آنها، دارای ترکیب تقریبی ۴۰ $Al_2O_3$–۶۰ $SiO_2$ هستند. نمودار Fe–O نشاندهندهٔ گسترهٔ نااستوکیومتری $Fe_{1-x}O$ (ε در شکل ۹–۵–۵) است که در فصول ۴ و ۵ و ۸ بررسی شد. نمودار FeO–MgO (شکل ۹–۵–۶) مجموعهٔ کامل محلولهای جامد را در زیر دمای خط انجماد نمایش می‌دهد. این نمودار با سیستم Cu–Ni که در شکل ۹–۲–۱ نشان داده شد کاملا قابل‌مقایسه است. نمودار فازی $BaTiO_3$–$CaTiO_3$ (شکل ۹–۵–۷) نشان می‌دهد که




**شکل ۹–۵–۷** نمودار $BaTiO_3$–$CaTiO_3$.

چگونه افزایش $CaTiO_3$ بردمای تغییر راست وجهی $BaTiO_3(\alpha)$ به‌ساختار مکعبی $BaTiO_3(\beta)$ اثر می‌گذارد. (به‌شکل ۸ـ۶ـ۲ مراجعه کنید.)

□ **مثال ۹ـ۵ـ۱** در نمودار Al–Si (شکل ۹ـ۵ـ۸) و در دمای اوتکتیك (577°C)، فاز $\beta$ فقط ۱۷ر۰ w/o آلومینیم را در خود حل می‌کند (یعنی ۸۳ر۹۹٪ Si دارد.) در نتیجه‌روی نمودار، حدحلالیت Al در $\beta$ بزرگتراز مقدار واقعی‌است.

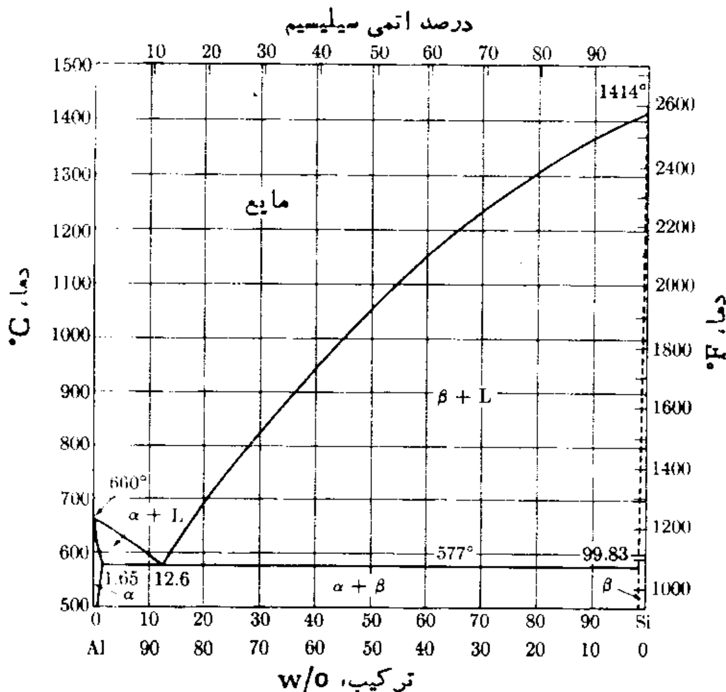
الف) اگر منحنی‌حلالیت خطی فرض شود، ترکیب $\beta$ برحسب Al در ۱۳۰۰ °C چیست؟

ب) آلیاژی که‌شامل ۹۸Si–۲Al است در ۱۳۰۰ °C به‌تعادل می‌رسد ومایع را خارج می‌کنیم. چه‌کسری از Al خارج شده است؟

ج) جامد باقیمانده در ۱۴۵۰ °C دوباره ذوب می‌شود درچه دمایی مجدداً انجماد شروع خواهد شد؟

د) ترکیب شیمیایی آن چیست؟

حل: الف) بافرض خطی بودن




**شکل۹ـ۵ـ۸** نمودار Al–Si.

$$\frac{\%۰٫۱۷}{۱۴۱۴-۵۷۷^\circ C}=\frac{C_\beta}{۱۴۱۴-۱۳۰۰^\circ C}$$

$$C_\beta=۰٫۰۲۳\ \mathrm{w/o\ Al}$$

ب) با استفاده از شکل ۹-۵-۸

$C_L=۲۱\ \mathrm{w/o\ Al}$. با استفاده از ۱۰۰ g

$$L=[۱۰۰\ \mathrm{g}]\left[\frac{۲-۰٫۰۲۳}{۲۱-۰٫۰۲۳}\right]=۹٫۴\ \mathrm{g}$$ مایع

$$\beta=۹۰٫۶\ \mathrm{g}$$

کسر آلومینیم خارج‌شده: $\frac{(۹٫۴\ \mathrm{g})(۰٫۲۱)}{(۱۰۰\ \mathrm{g})(۰٫۰۲)}=۰٫۹۹$

ج) انتهای بالایی منحنی ذوب در شکل ۹-۵-۸ تقریباً خطی است بنابراین

$$\frac{۲۱}{۱۴۱۴-۱۳۰۰^\circ C}=\frac{۰٫۰۲۳}{۱۴۱۴-T^\circ C}$$

$$T=۱۴۱۴-۰٫۱۲۴^\circ C$$

د) با تکرار (الف)

$$\frac{\%۰٫۱۷}{۱۴۱۴-۵۷۷^\circ C}=\frac{C'_\beta}{۰٫۱۲۴^\circ C}$$

$$C'_\beta=۰٫۰۰۰۰۳\ \mathrm{w/o\ Al}$$

توضیح. با چندبار تکرار این عمل متخصص متالورژی می‌تواند سیلیسیم را باکمتر از $۱/۱۰^۹$ اتم آلومینیم برای مواد نیمرسانا که نیاز به درجهٔ خلوص کنترل شده دارند، تولید کند.
▲

□ **مثال ۹-۵-۲** آلیاژی (به وزن ۸٫۵ کیلوگرم) حاوی ۳٫Cu ۹۳–۷٫Ag ۶ است. ابتدا ذوب و سپس تا دمای ۹۵۰°C سرد شده‌است. اولین جامد ($\beta$) در ۱۰۵۰°C~ ظاهر شده و حاوی تقریباً ۲% Ag است. جامد جدا شده تقریباً ۶% Ag دارد؛ ولی سرد کردن به‌حدی سریع صورت گرفته که ترکیب جامد اولیه تغییر نکرده است. در نتیجه میانگین ترکیب $\beta$ تقریباً ۴% Ag است. (نفوذ در مایع سریعتر است، بنابراین ترکیب آن در ۹۵۰°C تقریباً ۲۶% Ag است.) الف) چه‌مقدار مایع موجود است؟ ب) مرحلهٔ دیگر

سردکردن تا $۸۰۰^\circ C$، ادامهٔ انجماد را به‌همین‌صورت (و بدون تغییر ترکیب جامد قبلی) میسر می‌سازد. در $۸۰۰^\circ C$ چه‌فازهایی وجود دارند؟ ج) مقادیر نسبی آنها را معین کنید.

حل: الف)

$$\frac{(۶ر۷ - \sim۴)}{(۲۶ - \sim۴)}(۵ر۸\ \text{kg}) = \sim۰ر۷\ \text{kg}$$

ب) مایع (تقریباً ۶۵ Ag%)؛ جامد (۲ Ag% تا ۸%)

ج) میانگین ترکیب $\beta$ ثانویه تقریباً ۷ Ag% است

$$\left[\frac{۲۶ - \sim۷}{۶۵ - \sim۷}\right](۰ر۷\ \text{kg}) = \sim۰ر۲\ \text{kg}\ \text{مایع}$$

بنابراین

$$\sim۵ر۶\ \text{kg}\ \beta$$

توضیح. این نمونه‌ای است ازجدایش(شکل ۱۱-۲-۱ را ببینید). درهرفرایند انجماد این امری عادی است مگر آنکه برای نفوذ فرصتی داده شود. البته سردکردن به‌جای دو مرحله‌ای که نشان دادیم به‌صورت پیوسته صورت می‌گیرد. ▲

## ۹-۶ فازهای سیستم آهن - کربن

فولادها که آلیاژهای اصلی آهن و کربن‌اند اکثر واکنشها و میکروساختارهای متداول برای اصلاح خواص مواد را از خود بروز می‌دهند. همچنین آلیاژهای آهن و کربن به‌عنوان مهمترین مواد مهندسی‌ساز به‌کار می‌روند.

فولادهای متنوعی که تولید شده‌اند نشاندهندهٔ قابلیت تغییر فولادها به‌عنوان مواد مهندسی‌اند. ازیك طرف فولادهای بسیار نرمی که برای کاربردهای کشش عمیق تولید می‌شوند و برای ساخت قطعاتی چون سپراتومبیل و صفحهٔ‌اجاق استفاده می‌شوند و از طرف دیگر فولادهای فوق‌العاده‌سخت و چقرمه برای تیغه‌های بولدوزر و دنده‌ها به‌کار می‌روند. بعضی فولادها باید مقاومت بسیار زیادی در برابر خوردگی داشته باشند. فولادهایی که در مبدلهای الکتریکی به‌کار می‌روند، باید مشخصات مغناطیسی خاصی داشته باشند، به‌طوری‌که در هرثانیه چندین بار و بااتلاف انرژی کم، مغناطیسی و غیرمغناطیسی شوند و برخی دیگر باید کاملا غیرمغناطیسی باشند تا در مواردی چون ساعتهای مچی و مین‌یاب به‌کار آیند. برای توضیح هریك از خواص‌فوق می‌توان از نمودارهای فازی استفاده‌کرد.

ساختار بلوری آهن خالص قبل‌از ذوب‌شدن، دوبار تغییر می‌کند. همان‌طورکه در بخش ۳-۴ شرح داده‌شد، در $۹۱۲^\circ C$ ($۱۶۷۳^\circ F$) ساختار آهن از bcc به fcc و در $۱۳۹۴^\circ C$ ($۲۵۴۰^\circ F$) دوباره به bcc تبدیل می‌شود و تاهنگام ذوب در $۱۵۳۸^\circ C$ ($۲۸۰۰^\circ F$) ساختار bcc باقی می‌ماند.

**فریت یا آهن α.** ساختار آهن خالص دردمای اتاق، آهن α یافریت نامیده می‌شود. فریت باخلوص تجارتی کاملا نرم و انعطاف‌پذیر است. استحکام کششی آن از ۳۱۰ MPa کمتر است. فریت در دمای پایینتر از ۷۷۰°C (۱۴۱۸°F)، ماده‌ای فرومغناطیسی است. چگالی فریت ۷٫۸۸ $Mg/m^3$ (= ۷٫۸۸ $g/cm^3$) است.

از آنجاکه ساختار فریت مکعبی مرکزدار است، فضاهای بین اتمی آن کوچك و به‌طور مشخصی پخت‌اند وحتی نمی‌توانند اتم کروی و کوچك کربن را به‌راحتی درخود جای دهند. درنتیجه، حلالیت کربن در فریت بسیار کم است (کمتر از ۱ کربن در ۱۰۰۰ اتم آهن). اتم کربن کوچکتر از آن است که محلول جامد جانشینی تشکیل دهد و بزرگتر از آن است که محلول جامد بین نشینی خارجی به‌وجود آورد (بخش ۴-۲).

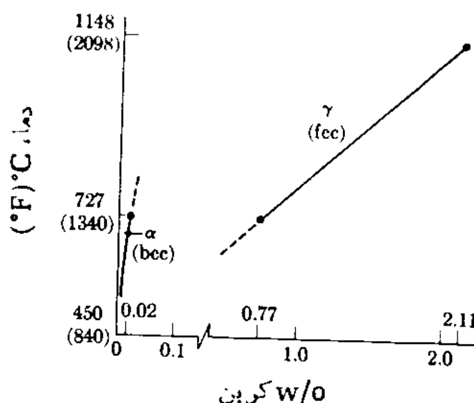
**استنیت یا آهن γ.** ساختارمکعبی با وجوه مرکزدار آهن استنیت یا آهنγ نام دارد و حالت پایدار آهن خالص بین ۹۱۲°C و ۱۳۹۴°C است. مقایسهٔ مستقیم خواص مکانیکی استنیت و فریت آسان نیست زیرا این مقایسه باید در دماهای مختلف انجام گیرد. به‌طور کلی در دماهایی که‌استنیت پایدار است، فلز نرم و انعطاف‌پذیر و بنابراین برای فرایندهای تولیدمناسب‌است. لذا بیشتر عملیات پتك‌کاری و نورد در ۱۱۰۰°C (۲۰۰۰°F) یا بالاتر که در آن آهن ساختارمکعبی باوجوه مرکزدار دارد، انجام می‌شود. استنیت درهیچ‌دمایی فرومغناطیسی نیست.

فضاهای بین‌اتمی‌ساختار مکعبی باوجوه مرکزدار از فضاهای بین‌اتمی فریت بزرگتر است. حتی‌در fcc نیز بزرگی حفره‌ها به‌قدری‌است که اتمهای کربن به‌زحمت درمکانهای بین‌نشینی جا می‌گیرند و تجمع اتمها در مکانهای بین نشینی در ساختار آهن کرنش به‌وجود می‌آورد. درنتیجه تمام حفره‌ها نمی‌توانند دریك زمان پرشوند. (تقریباً ۶% در ۹۱۲°C) و بیشینهٔ حلالیت فقط ۲٫۱۱% (یا ۹ a/o) کربن است (شکل ۹-۶-۱). بنا به‌تعریف، فولادها کمتراز ۲٫۱% کربن دارند و بنابراین تمام این‌مقدار در دماهای بالا دراستنیت حل می‌شود.

**آهن δ.** بالاتراز ۱۳۹۴°C (۲۵۴۰°F) استنیت پایدار نیست بنابراین ساختار بلوری مجدداً به bcc تبدیل می‌شود و آهن δ نام دارد. آهن دلتا مانند آهن آلفاست فقط گسترهٔ دمای آن فرق می‌کند. بنابراین معمولا فریت δ نامیده می‌شود. حلالیت کربن در فریت δ کم‌است ولی به‌دلیل بالاتر بودن‌دما به‌مراتب ازحلالیت آن در فریت آلفا زیادتر است.

**آهن ـ کاربید.** درآلیاژهای آهن ـ کربن اگر کربن‌از حد حلالیت بیشتر باشد فاز دیگری تشکیل می‌شود که‌معمولا آهن کاربید (سمانتیت) است.* آهن کاربید دارای ترکیب‌شیمیایی

* گرافیت فازکربن اضافی در بیشتر چدنهاست که در آنها مقدار سیلیسیم و کربن بالاست (بخش ۱۳-۱).




**شکل ۹-۶-۱** حلالیت کربن در آهن. در $20°C$ مقدار قابل اغماضی کربن در فریت (α) حل می‌شود. در $727°C$ این حلالیت فقط به $0/02\ w/o$ می‌رسد. حلالیت کربن در استنیت (γ) از $0/77\ w/o$ در $727°C$ تا $2/11\ w/o$ در $1148°C$ افزایش می‌یابد.

$Fe_3C$ است. این بدان معنی نیست که آهن کاربید را مولکولهای $Fe_3C$ تشکیل می‌دهد، بلکه واقعیت این است که اتمهای آهن و کربن درساختار بلوری کاربید، با نسبت سه به یک وجود دارند. سلول واحد $Fe_3C$ مکعب مستطیل است و در هرسلول ۱۲ اتم آهن و ۴ اتم کربن قرار دارد، بنابراین درصد وزنی کربن در آن ۶/۷٪ خواهد بود. چگالی آن $7/6\ Mg/m^3$ $(=7/6\ g/cm^3)$ است.

سمانتیت درمقایسه با استنیت و فریت بسیار سخت است و وجود آهن کاربید با فریت استحکام فولاد را تا حد زیادی افزایش می‌دهد (بخش ۱۰-۳). باوجود این، چون آهن کاربید انعطاف‌پذیر نیست، نمی‌تواند تمرکز تنش را تحمل کند درنتیجه (درمقایسه با مواد سرامیکی غیرانعطاف‌پذیر (بخش ۸-۷)) به‌تنهایی نسبتاً ضعیف است.

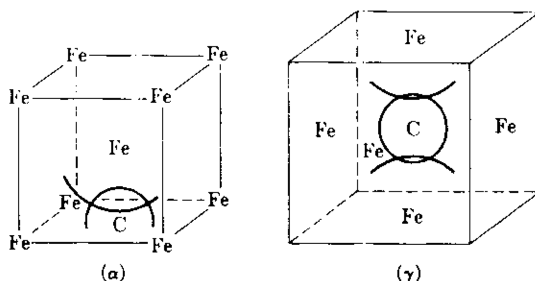
**مثال ۹-۶-۱** درآهن bcc، اتمهای کربن در مکانهای ۱/۲ و ۱/۲ و ۰ قرار می‌گیرند.

الف) با توجه به‌اینکه $r_C = 0/077\ nm$ و $R_\alpha = 0/124\ nm$ است، نزدیکترین اتمهای آهن چقدر باید جابه‌جا شوند تا کربن بین آنها قرار گیرد؟

ب) درآهن fcc اتم کربن در ۱/۲ و ۱/۲ و ۱/۲ قرار می‌گیرد. باتوجه به‌اینکه شعاع آهن γ $R_\gamma = 0/127\ nm$ است (جدول ۲-۵-۱)، اتمهای آهن چقدر جابه‌جا می‌شوند؟

حل: الف) بامراجعه به‌شکل ۹-۶-۲ (α)، نزدیکترین اتمهای آهن در ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲ و ۱/۲، ۱/۲، ۱/۲ — قراردارند

$$a = 4(0/124\ nm)/\sqrt{3} = 0/286\ nm$$




**شکل ۹-۶-۲** مثال ۹-۶-۱ را ببینید. با وجود آنکه ضریب فشردگی اتمی fcc بیش از bcc است (۷۴ر۰ درمقابل ۶۸ر۰) محلهای بین‌نشینی بزرگتری دارد (و تعـداد کمتر). در نتیجه اتمهای کربن در آهن γ کمتر از آهن α درفشارخواهند بود. این امر سبب حلالیت بیشتری در ساختار fcc می‌شود.

$$\Delta=(۰ر۱۲۴\,nm+۰ر۰۷۷\,nm)-(۰ر۲۸۶\,nm)/۲=۰ر۰۶\,nm$$

این امر فاصلهٔ بین مراکز اتمهای آهن را ۴۰٪ = ۲۸۶ر۰/(۰۶ر۰)۲ افزایش می‌دهد.

ب) مطابق شکل ۹-۶-۲ (γ)، نزدیکترین اتمهای آهن درمکانهای fcc هستند.

$$a=۴(۰ر۱۲۷\,nm)/\sqrt{۲}=۰ر۳۵۹\,nm$$

$$\Delta=(۰ر۱۲۷\,nm+۰ر۰۷۷\,nm)-(۰ر۳۵۹\,nm)/۲=۰ر۰۲۵\,nm$$

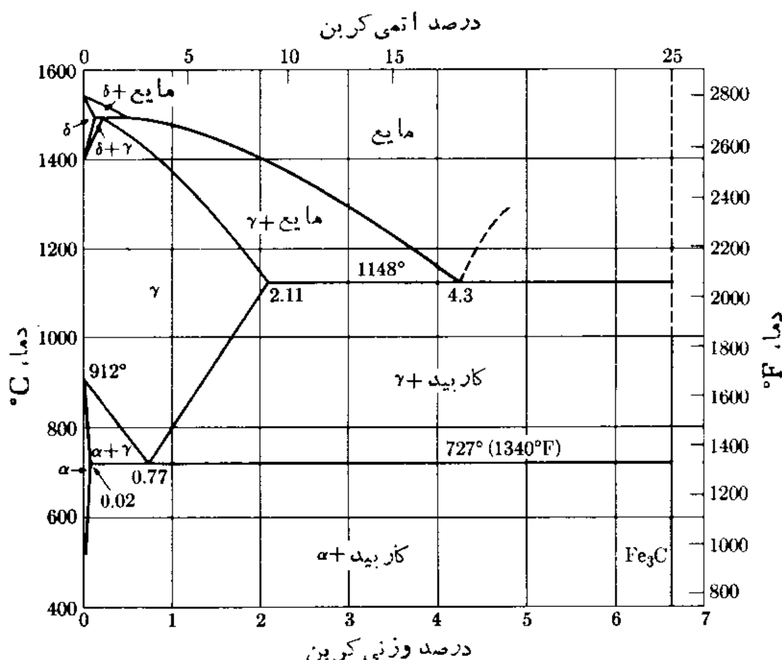
این امر فاصلهٔ بین مراکـز اتمهای آهن را ۱۴٪∼ = (۳۵۹ر۰)/(۰۲۵ر۰)۲ افزایش می‌دهد.

توضیح. گرچـه ضریب فشردگی اتمی درآهن bcc کمتر از fcc است حفره‌های موجود در آن کوچکتر نـد و وجود کربن جابه‌جایـی بیشتری را موجب می‌شود. [ضریب فشردگی اتمی درآهن bcc کم است (۶۸ر۰) زیرا ۶ مـکان بین‌نشینی شش‌گانـه (مربوط به ۱/۲، ۱/۲، ۰ و ۰، ۰، ۱/۲) و دوازده مـکان بین‌نشینی چهـارگانـه (مـربوط بـه ۱/۲، ۱/۴، ۰) دارد. آهن fcc (PF = ۷۴ر۰) درهرسلول واحد bcc فقط چهارمکان بین‌نشینی شش‌گانه وهشت مکان بین‌نشینی چهارگانه دارد (شکل ۸-۲-۲)]. ▲

## ۹-۷ نمودارفازی $Fe-Fe_3C$

شکل ۹-۷-۱ نمودارفازی آهن و آهن‌کاربید ($Fe_3C$) را نشان می‌دهد. عملیات گرمایی بیشترفولادها براساس چنین نمودار ی انجام می‌گیرد.

بدون درنظر گرفتن ناحیهٔ ۱٪-۰٪ کربن، شکل ۹-۷-۱ شباهت زیادی به‌نمودارهای



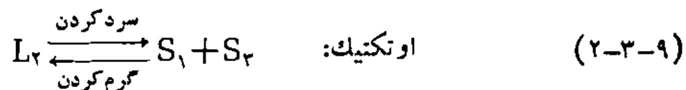

**شکل ۹-۷-۱** نمودار فازی $Fe-Fe_3C$. قسمت چپ و پایین نمودار در عملیات گرمایی فولاد بسیار موردتوجه است.

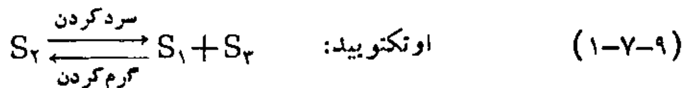
فازی قبلی دارد. ترکیب اوتکتیک در w/o ۴٫۳ (یا a/o ۱۷) کربن و دمای اوتکتیک در ۱۱۴۸°C (۲۱۰۰°F) واقع است. ترکیب چدنها، که معمولاً ۲٫۵ تا ۴٪ کربن دارند (بخش ۱۳–۱)، مبتنی بر ناحیهٔ اوتکتیک است. چدنها نقطهٔ ذوب نسبتاً پایینی دارند و به آسانی تغییر شکل می‌یابند و ریخته‌گری می‌شوند.

γ غنی از آن می‌تواند تا w/o ۲٫۱ (a/o ۹) کربن را درخود حل کند. همان‌طور که در بخش قبل بحث شد این اتمهای کربن درمکانهای بین‌نشینی آهن fcc قرار می‌گیرند. این فاز محلول جامد اساس وجود فولادهاست. از آنجاکه فولادها کمتر از ۱٫۲٪ کربن دارند و دماهای پتک‌کاری وسایر دماهای کار گرم که درناحیهٔ ۱۱۰۰ تا ۱۲۵۰°C (۲۰۰۰ تا ۲۳۰۰°F) انجام می‌گیرد، فلز می‌تواند تک‌فاز باشد که مزیتی برای تولید است.

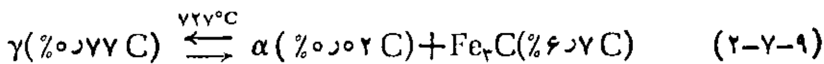
درناحیهٔ غنی از آهن ($Fe > 99\%$ و $C < 1\%$) نمودار $Fe-Fe_3C$ با نمودارهای قبلی فرق دارد و این اختلاف ازچند شکلی آهن و وجود فازهای bcc و fcc ناشی می‌شود. چون دراین کتاب ذوب و انجماد فولاد مدنظر نیست، دربارهٔ صور مختلف ناحیهٔ کم کربن دربالاتر از ۱۴۰۰°C بحث نمی‌شود، درعوض به‌حالتهای این نمودار در گسترهٔ دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰°C (۱۳۰۰°F تا ۱۶۵۰°F) و گسترهٔ صفر تا ۱٪ کربن بسیار توجه خواهد شد. زیرا دراین نواحی است که می‌توان میکروساختارهایی که برای خواص موردنظر در فولاد لازم‌اند را، به‌وجود آورد.

**واکنش اوتکتویید.** درشکل ۹ــ۷ــ۲ اضافه‌کردن نمك معمولی به‌آب (شکل ۹ــ۱ــ۲) با اضافه‌کردن کربن به‌استنیت مقایسه شده‌است و مشاهده می‌شود که درهردوصورت، افزودن جسم حل‌شدنی، گسترهٔ دمـای پایداری محلول را پایین می‌آورد. این دومثال فقط از یك نظر با هم فرق دارند: بالاتر ازدمای اوتکتیك، درسیستم یخ-نمك محلول مایع ودرسیستم آهن-کربن محلول جامد وجود دارد به‌طوری که درحین سردشدن واکنش‌اوتکتیك واقعی به‌وجود نمی‌آید. هرچند به‌دلیل‌شباهت این واکنش به‌واکنش اوتکتیك، آن‌را اوتکتویید (یعنی شبه اوتکتیك) می‌نامند


$$L_2 \underset{\text{گرم کردن}}{\overset{\text{سرد کردن}}{\rightleftarrows}} S_1+S_3 \qquad \text{اوتکتیك:} \qquad (۹\text{ــ}۳\text{ــ}۲)$$

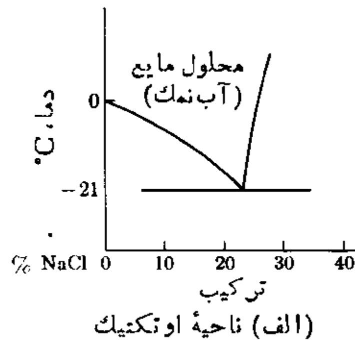

$$S_2 \underset{\text{گرم کردن}}{\overset{\text{سرد کردن}}{\rightleftarrows}} S_1+S_3 \qquad \text{اوتکتویید:} \qquad (۹\text{ــ}۷\text{ــ}۱)$$

دمای اوتکتویید بـرای آلیاژهای‌آهن-کربن ۷۲۷°C(۱۳۴۰°F) است و ترکیب اوتکتویید مربوط به‌آن در حدود ۰٫۸٪ کربن دارد. واکنش اوتکتویید ویـژهٔ آلیاژهای Fe–C به‌این صورت‌است

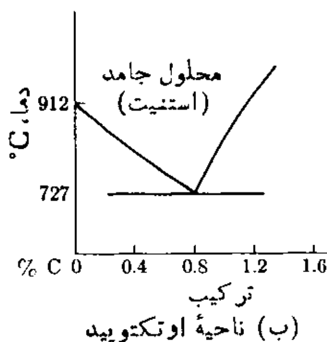

$$\gamma(\%۰٫۷۷\,C) \overset{۷۲۷°C}{\rightleftarrows} \alpha(\%۰٫۰۲\,C)+Fe_3C(\%۶٫۷\,C) \qquad (۹\text{ــ}۷\text{ــ}۲)$$

شکل ۹ــ۷ــ۳ ناحیهٔ اوتکتویید رابا جزئیات بیشتری نسبت به‌شکل ۹ــ۷ــ۱ نشان می‌دهد.

**مثال ۹ــ۷ــ۱** فولادی با ترکیب اوتکتویید (تقریباً ۰٫۸٪ کربن) پس ازگرم کردن تـا ۸۰۰°C به‌آهستگی تـا دمای اوتکتویید (۷۲۷°C) سرد می‌شود. کاربید تشکیل شده در ۱۰۰ گرم از این فولاد را حساب کنید.

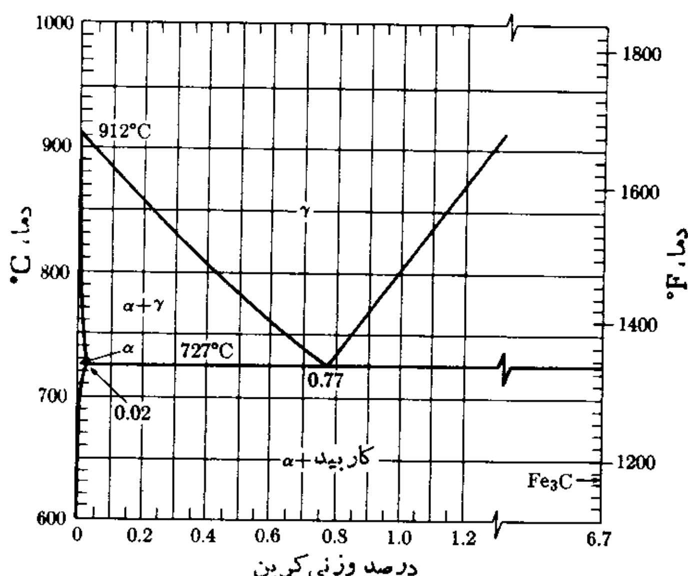


(الف) ناحیهٔ اوتکتیك



(ب) ناحیهٔ اوتکتویید

**شکل ۹ــ۷ــ۲** نواحی‌اوتکتیك و شبه‌اوتکتیك (اوتکتویید) درنمودارهای‌فازی.




**شکل۹ـ۷ـ۳** ناحیهٔ اوتکتویید در نمودار تعادلی $Fe–Fe_3C$. (به‌شکل۹ـ۷ـ۱ رجوع‌کنید). فولادهایی که تقریباً ۸ر۰٪کربن دارند معمولا فولاد اوتکتویید نامیده می‌شوند. فولادهای هیپراوتکتویید بیشتر از این مقدار و فولادهای هیپواوتکتویید کمتر از این مقدار کربن دارند.

حل: در ۷۲۶°C (۱۳۳۹°F): (و ۸۸ گرم α)

$$\text{کاربید} = \frac{۰٫۸ - ۰٫۰۲}{۶٫۷ - ۰٫۰۲}(\text{۱۰۰ گرم}) = \text{۱۲ گرم}$$

توضیح. با وجود آنکه اندازه‌گیریهای دقیقتر نشان داده‌که ترکیب اوتکتویید ۷۷ر۰٪کربن است، ولی معمولا C ۸ر۰٪ به‌کار می‌رود. ▲

**مثال ۹ـ۷ـ۲** برای آلیاژ ۶۰ر۰٪کربن‌ـ۴۰ر۹۹٪ آهن، کسر فریت، استنیت وکاربید را به‌صورت تابعی از دما رسم کنید.

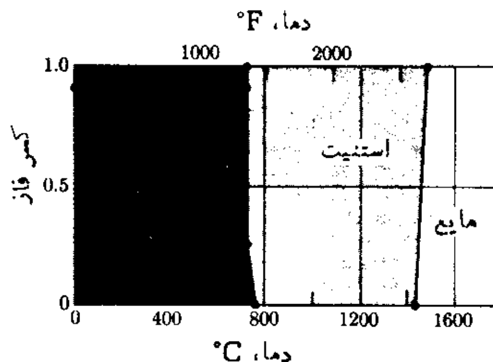
حل: در ۷۲۸°C (۱۳۴۲°F):

$$\text{فریت} = \frac{۰٫۷۷ - ۰٫۶۰}{۰٫۷۷ - ۰٫۰۲} = ۰٫۲۳$$

در ۷۲۶°C (۱۳۳۹°F):

$$\text{فریت} = \frac{۶٫۷ - ۰٫۶۰}{۶٫۷ - ۰٫۰۲} = ۰٫۹۱$$

برای فازهای دیگر و در دماهای دیگر نتایج محاسبه درشکل۹ـ۷ـ۴ دیده می‌شود. ▲




**شکل ۹-۷-۴** کسر فازها (در فولاد Fe-۰/۶C در۹۹۴). (مثال۹-۷-۲ را ببینید.) در۷۲۸°C(۱۳۴۲°F) تقریباً ۳/۴ این فولاد استنیت است. از آنجا که در این دما γ ترکیب اوتکتویید را دارد، دربخش بعد خواهیم دید که چنین فولادی حدود ۷۵٪ پرلیت (و ۱/۴ فریت پرو اوتکتویید) دارد).

## ۹-۸ تجزیهٔ استنیت

واکنش اوتکتو یید آهن-کربن در حین سرد شدن موجب تشکیل فریت، $\alpha$، و کاربید $\overline{C}$ می‌شود که به‌طور همزمان از تجزیهٔ استنیت γ به‌وجود می‌آیند



$$\gamma(\sim ۰٫۸\%C) \longrightarrow \alpha+\overline{C} \qquad (۹-۸-۱)^*$$

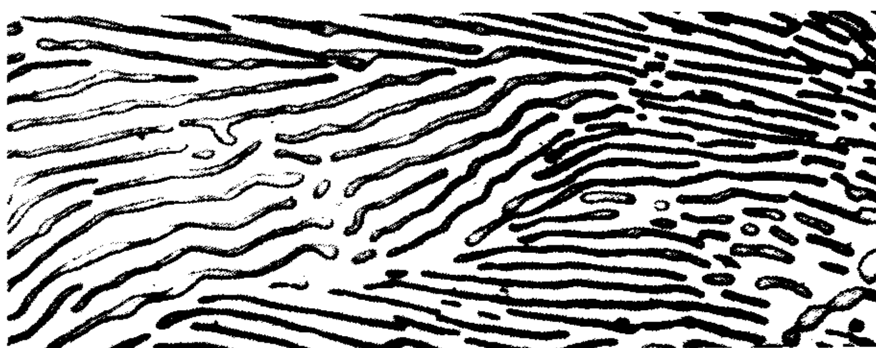
در مخلوط حاصل حدود۱۲٪کاربید و بیش از ۸۸٪ فریت وجود دارد. به‌دلیل اینکه این کاربید و فریت همزمان تشکیل می‌شوند،کاملا مخلوط شده‌اند. از مشخصات این مخلوط لایه‌ای بودن‌است یعنی‌ازلایه‌های متناوب فریت وکاربیدترکیب شده‌است (شکل ۹-۸-۱). میکروساختار حاصل پرلیت نامیده می‌شودکه درتکنولوژی‌آهن وفولاد بسیارمهم‌است‌زیرا با عملیات‌گرمایی مناسب درهرنوع فولادی می‌توان آن را به‌وجودآورد.

پرلیت مخلوط خاصی از دوفاز است که از تبدیل استنیت با ترکیب اوتکتوییدی، به‌فریت و کاربید حاصل می‌شود. این تشخیص مهم‌است، زیرا مخلوطهای دیگری از فریت وکاربید براثر واکنشهای دیگری تشکیل می‌شوندکه میکروساختار آنها لایه‌ای نیست [شکلهای ۱۰-۲-۲ (ب) و۹-۸-۱ را با هم مقایسه‌کنید] و درنتیجه خواص‌این‌مخلوطها با خواص پرلیت فرق دارد (بخش‌۱۰-۳ را ببینید).

ازآنجاکه پرلیت از استنیت با ترکیب اوتکتوییدی به‌وجود می‌آید مقدار پرلیت موجود برابرمقدار استنیت اوتکتوییدی‌است‌که تبدیل‌شده‌است (شکل ۹-۸-۲). این‌مقدار

---

* از علامت $\overline{C}$ برای نشان دادن کاربید استفاده شده‌است که تا با علامت C، نشاندهندهٔ عنصر کربن، اشتباه نشود. برای محاسبات از ۰٫۸٪کربن به‌عنوان مقدارتقریبی ترکیب اوتکتویید استفاده شده‌است.



**شکل۹-۸-۱** پرلیت (۲۵۰۰ ×). این میکروساختار که مخلوطی لایه‌ای از فریت (زمینه روشن) وکاربید (نواحی تاریک) است، از استنیت با ترکیب اوتکتویید به‌وجودآمده‌است، لذا این پرلیت همان مقدار و ترکیب اوتکتویید را داراست.

را می‌توان با اندازه‌گیری مقدار $\gamma$ درست بالای دمای اوتکتویید، محاسبه‌کرد. مثالهای ۹-۸-۱ و ۹-۸-۲ این مطلب را نشان می‌دهند.

**مثال ۹-۸-۱** مقدار پرلیت را درآلیاژ C ۵ر۰٪-Fe ۵ر۹۹٪ که از ۸۷۰°C (۱۶۰۰°F) به‌آهستگی سرد شده‌است تعیین‌کنید (مبنا: ۱۰۰ گرم آلیاژ).

حل: از ۸۷۰ تا ۷۸۰°C: ۱۰۰ گرم استنیت با ۵ر۰٪ کربن وجود دارد. از ۷۸۰ تا ۷۲۷°C(+): فریت از استنیت جدا شده ومقدارکربن استنیت به‌تقریباً ۸ر۰٪ افزایش می‌یابد.

در ۷۲۷°C(+): ترکیب فریت = C ۰۲ر۰٪

مقدارفریت = ۳۸ گرم

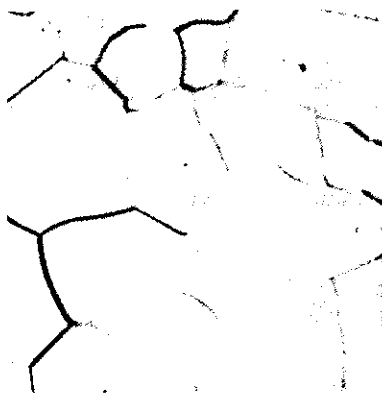
ترکیب استنیت = تقریباً C ۸ر۰٪

مقدار استنیت = ۶۲ گرم

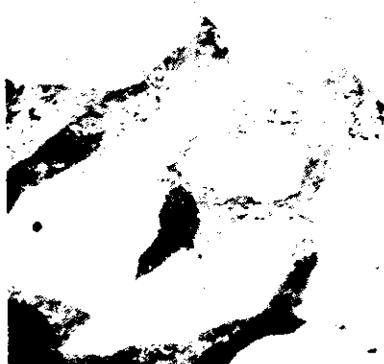
در ۷۲۷°C(−): مقدار پرلیت ۶۲گرم (یعنی برابر مقدار استنیت اوتکتویید و با همان ترکیب‌است).

توضیح. محاسبات بالابراین فرض‌استواراست‌که برای رسیدن به‌تعادل زمان‌کافی وجود داشته باشد. فریتی‌که دربالاتر از ۷۲۷°C (یعنی قبل از واکنش‌اوتکتویید) تشکیل شده‌است فریت پرو اوتکتویید نام دارد و آن قسمت از فریت‌که جزء پرلیت است و از ترکیب اوتکتویید حاصل‌شده فریت اوتکتویید نامیده می‌شود (شکل۹-۸-۲ (ب)-(د) را ببینید). ▲

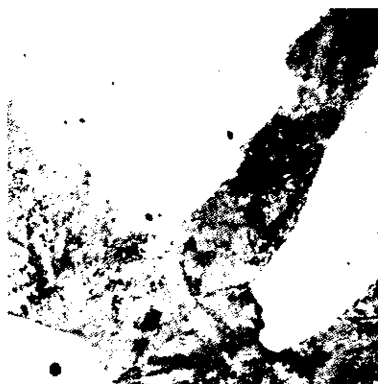
**مثال ۹-۸-۲** از نتایج مثال بالا استفاده‌کنید ومقدارفریت وکاربید موجود درآلیاژ ذکر شده را الف) در ۷۲۵°C(−) و ب) در دمای اتاق حساب‌کنید. مبنا: ۱۰۰ گرم آلیاژ



(الف) % 0C



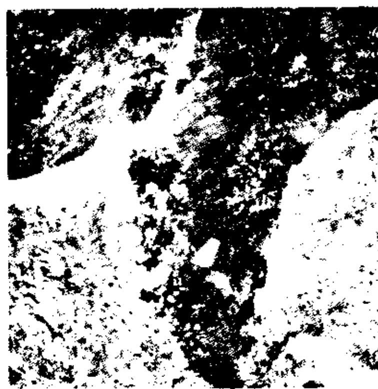
(ب) % 0.20 C



(ج) % 0.35 C



(د) % 0.5 C



(ه) % 0.7 C



(و) % 1.2 C

**شکل ۹-۸-۲** آلیاژهای «آهن-کربن» تابکاری شده (۵۰۰ ×). درمراحل (الف) تا (و) مقدار کربن افزایش می‌یابد و بنابراین کاهشی درمقدار فریت پرو اوتکتوید (نواحی سفید) که قبل‌از واکنش اوتکتوید از استنیت جدا می‌شود، وجود دارد. نواحی خاکستری پرلیت‌است یعنی مخلوط لایه‌ای فریت اوتکتوید وکاربید. در(و) زمینهٔ بین دانه‌های اولیهٔ استنیت، کاربید پرواوتکتوییداست، زیرا مقدارکربن آن فولاداز ۰٫۸ W/O درصد بیشتراست.

(از برخی داده‌های مثال ۹ـ۸ـ۱ استفاده شده است).

حل: الف) در $727°C(-)$ و درصورتی که اوتکتویید تقریباً ۰٫۸٪ کربن داشته باشد

$$\text{مقدار کاربید} : (62)\frac{0.8-0.02}{6.7-0.02} = 7.2 \quad \frac{\text{گرم کاربید}}{\text{۱۰۰ گرم فولاد}}$$

فریت تشکیل شده با پرلیت (اوتکتویید) ۵۴٫۸ = ۷٫۲ — ۶۲ : مقدار فریت
فریتی که قبل از پرلیت تشکیل شده است (پرو اوتکتویید) ۳۸ گرم
مقدار کل فریت در ۱۰۰ گرم فولاد ۹۲٫۸ گرم
شق دیگر

$$\text{مقدار کاربید} = \frac{0.5-0.02}{6.7-0.02} = 7.2 \frac{\text{گرم کاربید}}{\text{۱۰۰ گرم فولاد}}$$

$$\text{مقدار فریت} = \frac{6.7-0.5}{6.7-0.02} = 92.8 \frac{\text{گرم فریت}}{\text{۱۰۰ گرم فولاد}}$$

ب) در دمای اتاق (حلالیت کربن در فریت در دمای اتاق را برای این محاسبات می‌توان صفر در نظر گرفت)

$$\frac{0.5-0}{6.7-0} = 7.5 \frac{\text{گرم کاربید}}{\text{۱۰۰ گرم فولاد}}$$

$$\frac{6.7-0.5}{6.7-0} = 92.5 \frac{\text{گرم فریت}}{\text{۱۰۰ گرم فولاد}}$$

توضیح. از نقطهٔ اوتکتویید به‌پایین حلالیت کربن در فریت تقریباً به‌صفر می‌رسد به‌همین دلیل، کاربید اضافی از فریت جدا می‌شود و رسوب می‌کند. ولی این کاربید اضافی متعلق به‌پرلیت نیست (هریک از این محاسبات با فرض رسیدن به‌تعادل انجام می‌گیرد). ▲

## ۹ـ۹ فولادهای ساده و کم آلیاژ

گروه عمده‌ای از فولادها چنان طرح می‌شوند که عملیات گرمایی آنها در ناحیهٔ $\gamma$ انجام گیرد (استنیتی‌کردن) وسپس با سرد کردن، استنیت موجود مستقیماً (یا به‌طور غیرمستقیم) به‌فریت و کاربید تجزیه شود $(\alpha+\bar{C})$. اگر فولادی اساساً دارای آهن و کربن* باشد،

* به‌علاوه تقریباً ۰٫۵٪Mn به‌منظور انجام فرایندها.

فولاد ساده نامیده می‌شود. هرگاه چنین فولادی کمتراز پنج‌درصد عناصر آلیاژی از قبیل نیکل، کرم، مولیبدنیم، منگنز و سیلیسیم داشته باشد، فولاد کم‌آلیاژ نامیده می‌شود. عناصر آلیاژی اساساً به‌این منظوراضافه می‌شوندکه سرعت تجزیهٔ استنیت به $(\alpha+\bar{C})$ را حین عملیات گرمایی‌کاهش‌دهند، و همان‌طورکه درفصل ۱۰ خواهیم دید نتیجهٔ این عمل تولید فولادهای بسیارسخت است.

فریت پرواوتکتویید [ شکلهای ۹ــ۸ــ۲ (ب) تا (ه)] بسیار راحت‌تر از فریتی که در پرلیت است تغییرشکل مـی‌یابد زیرا مقدار آن بیشتر است و مـانند فریت اوتکتویید توسط لایه‌های سخت‌تر و صلبترکاربید تقویت نشده است. فولادهایی که درمیکروساختار آنها نواحی فریت جداگانه وجـود دارد (و مقدارکربن آنها کمتراز ترکیب اوتکتویید است)، هیپواوتکتویید نامیده می‌شوند. به‌همین ترتیب هرگـاه فولاد اوتکتویید به‌آهستگی سرد شود، بیشتر شامـل پرلیت خواهد بود وفولادی‌کـه مقدارکربن‌آن بیشتر از ترکیب اوتکتویید است و کاربید پرواوتکتویید دارد، فولادهیپراوتکتوییدنام‌دارد [شکل ۹ــ۸ــ۲ (و)]. فولادهای «هیپواوتکتویید» متداولتر از فولادهای هیپراوتکتوییدند.

**نامگذاری فولادها.** اهمیت کربن در فولاد موجب شده است‌که انواع فولاد را برحسب مقدارکربن‌آنها مشخص‌کنند و برای این‌کار عددی «چهار رقمی» به‌کار می‌رود که دو رقم سمت راست آن صدبرابر درصد کـربن را نشان مـی‌دهد (جـدول ۹ــ۹ــ۱). مثلا فولاد ۱۰۴۰، ۴۰ر۰٪ (بعلاوه پـامنهای مقدارکمی) کربن دارد. دو رقم سمت‌چپ نمایـانگر عناصرآلیاژی‌اضافه شده به‌آهن و کربن است، این‌طبقه‌بندی (۱۰ × ×) برای فولادهای ساده‌ای که مقدار اندکی عناصرآلیاژی دارند به‌کار رفته است.

این علامت‌گذاریها استاندارد است و توسط انجمن آهن و فولاد آمریکا (AISI) و جامعهٔ مهندسان صنایع‌اتومبیل‌سازی و حمل‌ونقل آمریکا (SAE) هردو پذیرفته شده است. بسیاری از فولادهای تجارتی به‌دلیل‌متنوع بودن عناصر آلیاژی، دراین‌طبقه‌بندی‌گنجانیده نشده‌اند. ولی‌معمولا این فولادها موارد استفادهٔ ویژه و محدودی‌دارند و آلیاژهایی نیستند که معمولا با آنها سروکار داشته باشیم.

☐ **تغییرمکان اوتکتویید.** شکل۹ــ۷ــ۳ ناحیهٔ‌اوتکتوییدرا برای‌نموداردفازی«$Fe-Fe_3C$» یعنی حالتی‌که فقط‌آهن و آهن‌کاربید موجود است نشان می‌دهد. درچنین صورتی دمـای اوتکتویید $727°C$ ($1340°F$) وترکیب آن درست زیر ۸ر۰٪ کربن است.

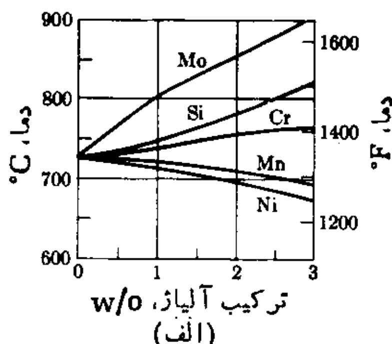
در فولادهـای آلیاژی اتمهای آهن و کـربن بـا یکدیگر و سایر انـواع اتمهـا کوئوردینانس می‌شوند بنابراین در صورت وجود عناصر دیگر، تغییر کردن مقدار کربن اوتکتویید و دمای آن‌قابل‌انتظار است. شکل ۹ــ۹ــ۱ (الف) تغییر دمای اوتکتویید را از $727°C$، درصورت افزوده شدن نیکل، منگنز، کرم و مولیبدنیم، نشان می‌دهد. دو عنصر اولی دمای اوتکتویید را کاهش‌می‌دهند زیرا با آهن محلول جامد fcc به‌وجودمی‌آورند.

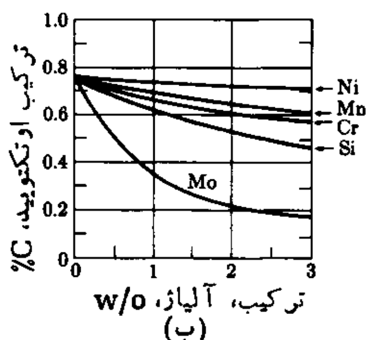
**جدول ۹-۹-۱** نامگذاری فولادهای AISI و SAE

| اعداد AISI یا SAE | ترکیب |
|---|---|
| ۱۰×× | فولادهای ساده کربنی* |
| ۱۱×× | فولادهای ساده (برای بالابردن قابلیت ماشینکاری به‌این فولاد مجدداً گوگرد اضافه شده است) |
| ۱۵×× | منگنز (۰ر۲–۰ر۱٪) |
| ۴۰×× | مولیبدنیم (۳۰ر۰–۲۰ر۰٪) |
| ۴۱×× | کرم (۲۰ر۱–۴۰ر۰٪)، مولیبدنیم (۲۵ر۰–۰۸ر۰٪) |
| ۴۳×× | نیکل (۰۰ر۲–۶۵ر۱٪)، کرم (۹۰ر۰–۴۰ر۰٪) مولیبدنیم (۳۰ر۰–۲۰ر۰٪) |
| ۴۴×× | مولیبدنیم (۵ر۰٪) |
| ۴۶×× | نیکل (۰۰ر۲–۴۰ر۱٪)، مولیبدنیم (۳۰ر۰–۱۵ر۰٪) |
| ۴۸×× | نیکل (۷۵ر۳–۲۵ر۳٪)، مولیبدنیم (۳۰ر۰–۲۰ر۰٪) |
| ۵۱×× | کرم (۲۰ر۱–۷۰ر۰٪) |
| ۶۱×× | کرم (۱۰ر۱–۷۰ر۰٪)، وانادیم (۱۰ر۰٪) |
| ۸۱×× | نیکل (۴۰ر۰–۲۰ر۰٪)، کرم (۵۵ر۰–۳۰ر۰٪) مولیبدنیم (۱۵ر۰–۰۸ر۰٪) |
| ۸۶×× | نیکل (۷۰ر۰–۳۰ر۰٪)، کرم (۸۵ر۰–۴۰ر۰٪) مولیبدنیم (۲۵ر۰–۰۸ر۰٪) |
| ۸۷×× | نیکل (۷۰ر۰–۴۰ر۰٪)، کرم (۶۰ر۰–۴۰ر۰٪)، مولیبدنیم (۳۰ر۰–۲۰ر۰٪) |
| ۹۲×× | سیلیسیم (۲۰ر۲–۸۰ر۱٪) |

×× مقدار کربن ××ر۰٪

* تمام فولادهای سادهٔ کربنی حدوداً حاوی ۵۰ر۰٪± منگنز و مقداری (w/o ۰۵ر۰>) عناصر دیگرند.




**شکل ۹-۹-۱** نقاط اوتکتویید در آلیاژهای Fe-X-C. (× سومین جزء یعنی Mo، Si، Cr، Mn یا Ni است.) اثر اضافه‌کردن عناصر آلیاژی روی الف) دمای واکنش اوتکتویید و ب) اثر آنها روی مقدار کربن اوتکتویید.

(استنیت سازند)، Cr و Mo دمای اوتکتویید را بالا می‌برند زیرا این‌عناصر خـود bcc بوده و بنابراین در فولادها فریت سازند. شکل ۹-۹-۱ (ب) نشان می‌دهدکه هرکدام از این عناصر آلیاژی مقدارکربن اوتکتوید را از ۷۷ر۰% کاهش می‌دهد. این منحنیها ازاین جهت با ارزش‌اندکه پیش‌بینی دمای استنیتی‌کردن به‌منظور عملیات گرمایی فولادهای کم کربن را میسر می‌سازند.*

☐ **مثال ۹-۹-۱** فولاد SAE ۱۵۴۰ (C=%۰ر۳۹؛ Mn=%۱ر۹۷) باید استنیتی شود الف) اگر لازم باشد گرمایش، ۳۰°C بالاتر ازحد استنیت انجام گیرد تا واکنش تسهیل شود، دمای لازم چقدر است؟
ب) درحین سردشدن چقدر پرلیت تشکیل می‌شود؟

حل: طبق شکل ۹-۹-۱ نقطهٔ اوتکتوپید به C~%۰ر۶۵، $T_e$=۷۱۰°C منتقل شده است. در C۰ر۳۹% کنارهٔ پایینی ناحیهٔ γ تقریباً در ۷۷۰°C است (شکل ۹-۹-۲)

الف) ~۷۷۰+۳۰°C=۸۰۰°C(۱۴۷۰°F)

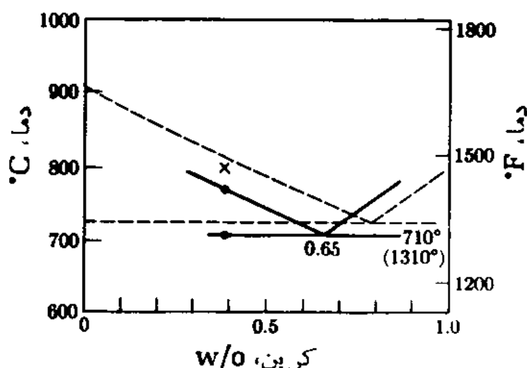
ب) ۰ر۶ = کسر γ در ۷۱۱°C (بادرون‌یابی بین ۰% و ۰ر۶۵% درشکل ۹-۹-۲)

۰ر۶ = نسبت پرلیت پایینتراز ۷۱۰°C

توضیح. می‌توان فرض‌کردکه ضریب زاویهٔ خطوط حلالیتی‌که ناحیهٔ γ را مشخص می‌کنند با اضافه‌کردن مقدارکمی از عناصر آلیاژی تغییر نمی‌کند. (درصورت بالابودن مقدارعناصر آلیاژی، این فرض صحت نخواهد داشت.)

درصورت عدم وجود Mn ۱ر۹۷%، دمای استنیتی‌کردن «۸۱۰+۳۰°C» مـی‌شد و تنها نیمی‌از فولاد، پرلیت می‌شد. ▲

* نمودارهای فازی مواد چند جزئی بیش‌از حد پیچیده‌اند.




**شکل ۹-۹-۲** تغییرمکان اوتکتویید (مثال ۹-۹-۱). با اضافه‌کردن ۲٪ Mn، ترکیب اوتکتویید به ۶۵ر۰٪ کربن و دمای آن به ۷۱۰°C (۱۳۱۰°F) کاهش می‌یابد. بنابراین گامای بیشتری برای تشکیل پرلیت وجود دارد.

## مرور و بررسی مطالب

در این فصل دوهدف دنبال می‌شد:

۱. تأکید براین‌نکته‌که برای کنترل و اصلاح مواد چندفاز باید چگونگی استخراج اطلاعات لازم را از نمودارهای فازی دانست.

۲. بررسی سیستم Fe-C به‌طور دقیق تا به‌عنوان الگوی نمونه در ساختارهای حالت جامد فصل ۱۰ و برای کنترل میکروساختارها در فصل ۱۱ به‌کار آید.

## خلاصه: نمودارهای فازی

**از نمودار فازی که نموداری از منحنیهای حدحلالیت است، سه‌نوع اطلاعات می‌توان به‌دست آورد:**

**۱. نمودار فازی نشان می‌دهدکه در شرایط تعادل برای دما و ترکیبهای مختلف چه فاز (یا فازهایی) وجود دارد.**

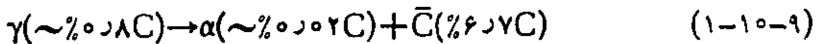
**۲. ترکیب شیمیایی فازهایی‌که در حال تعادل‌اند را بااستفاده از نمودار فازی می‌توان دریافت: الف) درنواحی تک‌فازترکیب همان ترکیب آلیاژ است؛ (ب) در ناحیهٔ دوفازی، ترکیب شیمیایی فازها در محل تقاطع همدما با منحنیهای حد حلالیت واقع‌است. ترکیب شیمیایی را برحسب درصد اجزاء گزارش می‌دهند.**

**۳. کسر مقدار هرفاز را در آلیاژ دوفازی نیز می‌توان با درون‌یابی در طول همدما تعیین کرد، این همان «قاعدهٔ اهرم» است. این مقادیر را می‌توان برحسب درصد فازی بیان کرد.**

## خلاصه: نمودار $Fe-Fe_3C$

سیستم آهن - کربن دارای ناحیهٔ اوتکتیك است که اساس وجـود چدنهاست، ولی مبنای وجود فولادها آن است که آهن در دماهای بالا fcc می‌شود و می‌تواند کربن مـوجود را درخود حل کند. بنابراین فولاد معمولاً به‌صورت مادهٔ تك‌فاز پتك‌کاری و گرمکاری می‌شود.

محلول جامد fcc (استنیت یا $\gamma$) حین سرد شدن به‌فریت bcc ($\alpha$) و کاربید ($\bar{C}$) تجزیه می‌شود. این تجزیه، واکنشی اوتکتویید است



$$\gamma(\sim\%۰٫۸C)\rightarrow\alpha(\sim\%۰٫۰۲C)+\bar{C}(\%۶٫۷C) \qquad (۹-۱۰-۱)$$

عملیات گرمایی فولاد شامل تشکیل استنیت و سپس تجزیهٔ مستقیم یـا غیرمستقیم آن است (فصل ۱۰) تا میکروساختارهای مختلفی به‌دست آید. میکروساختار به‌دست آمده خواص فولاد را کنترل می‌کند (فصلهای ۱۰ و ۱۱).

دو گروه عمده از فولادها عبارت‌اند از (۱) فولادهای سادهٔ کربنی و (۲) فولادهای کـم‌آلیاژ. گروه نخست صرفاً آلیاژ $Fe-Fe_3C$ هستند و دستهٔ دوم تـا پنج‌درصد عناصر آلیاژی‌از قبیل Mn، Ni، Cr، Mo، W یا Si دارند.

## فهرست نمودارهای فازی



## سؤالات تشریحی

۱. با استفاده ازشکل ۹-۱-۲؛ روشی برای تصفیهٔ آب دریا پیشنهاد کنید.

۲. در اقیانوسهای قطب‌شمال (‎−۱٫۵°C‎) اگر مقدار NaCl تـا ۲٫۵٪ کاهش یـابد، ذوب‌شدن برفها متوقف می‌شود. چرا؟

۳. شرح دهید که چرا اگر عسل درظرف روباز نگهداری شود «شکرك» می‌زند.

۴. دمای خط انجماد، حد دمای مهمی برای فرایندهای گرمکاری فلزات است چرا؟
۵. فرق بین ترکیب شیمیایی فاز و مقدار فاز را ذکر کنید.
۶. چرا ترکیب مایع اوتکتیك، $L_2$ همیشه بین ترکیبات دوجامد، $S_1$ و $S_2$ قرار می‌گیرد؟
۷. چرا ترکیب تعادلی دوفاز همیشه در محدوده‌ای قرار دارد که در آن، همدما از ناحیهٔ دوفاز عبور می‌کند؟
۸. برای به‌دست آوردن کسر مقدار دوفاز می‌توان از درون‌یابی درجهت همدمای افقی استفاده کرد. نمی‌توانیم با درون‌یابی در جهت خط عمودی ترکیب، جواب درستی به‌دست آوریم. با استفاده از لحیم ۷۰Pb–۳۰Sn نشان دهید که چرا از حالت اخیر نمی‌توان استفاده کرد.
۹. عملیات جبری را، که درست قبل از رابطهٔ (۹–۴–۳) به‌آنها اشاره شد، انجام دهید. (راهنمایی: از رابطهٔ (۹–۴–۲) X را به‌دست آورده و در رابطهٔ (۹–۴–۳) قرار دهید.)
۱۰. محاسبات تعیین «مرکز ثقل» را برای تعیین کسر مقدار فاز انجام دهید. نشان دهید که نتیجهٔ این محاسبات با «قاعدهٔ اهرم» و «روش درون‌یابی» یکسان است.
□ ۱۱. شرح دهید که چرا مقدار a در آلیاژ ۸۰Ag–۲۰Cu در دمای اوتکتیك قابل تعیین نیست. ولی اگر ۵۰ گرم $\alpha$ در ۱۰۰ گرم آلیاژ داشته‌باشیم درصورت وجود تعادل، دما باید ۷۸۰°C باشد.
۱۲. شکلی از نمودار فازی Cu–Sn (شکل ۹–۵–۲) درمحدودهٔ ۴۷۵°C–۵۷۵°C و ناحیهٔ (۳۳٪Sn — ۱۰٪) با مقیاس بزرگتر رسم کنید. مسئله‌ای طرح کنید که در آن ترکیب فازی و مقادیر آنها خواسته شده باشد.
۱۳. میلهٔ بلندی از سیلیسیم را از گرمکن کوچکی به‌آهستگی عبور می‌دهند و درنتیجه «تصفیهٔ ناحیه‌ای» انجام می‌شود. به‌طوری که ناحیهٔ ذوب‌شده از یك سر آن شروع و به‌طرف انتهای دیگر حرکت کند و پس از گذشتن از ناحیهٔ گرم شده منجمد شود. شرح دهید که چرا با تکرار این عمل می‌توان ناخالصیها را از حذف کرد. (به‌مثال ۹–۵–۱ رجوع کنید).
۱۴. فرض کنید اتم کربنی درمحل ۱/۲، ۱/۲، ۰ در فریت قرار داشته باشد. عدد کوئوردیناسیون آن چقدر است؟ درهرسلول واحد چه‌تعداد از این‌مکانها وجود دارد؟
۱۵. بر اساس توضیحات مثال ۹–۶–۱، شرح دهید که چرا در فاز $D_C > D_\alpha$ در فاز، با وجود آنکه استنیت می‌تواند چند برابر فریت، اتمهای کربن را درخود حل کند.
۱۶. داده‌های شکل ۹–۷–۳ در موارد مختلف در این کتاب مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین ارزش حفظ کردن را دارد زیرا دراین‌صورت دیگر لازم نیست هر بار به‌آن مراجعه کنید.
۱۷. پرلیت ساختاری دوفازی شامل $\alpha$ و $\bar{C}$ است. فرق بین فازها و میکروساختارها را ذکر کنید.
۱۸. در حل مثال ۹–۸–۲ (الف) به‌فریت اوتکتویید و فریت پرواوتکتویید اشاره شد.

براساس شکلهای ۹ـ۸ـ۲ (د) و ۹ـ۷ـ۳ تفاوت آنها را شرح دهید.

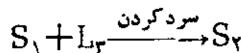
۱۹. الگوی نامگذاری AISI-SAE را برای کسی که شیمی می‌داند ولی این درس را نخوانده است شرح دهید.

☐ ۲۰. حدس بزنید که آیا تنگستن (bcc) دمای تجزیهٔ استنیت را بالامی برد یا پایین می‌آورد؟

۲۱. شکل ۴ـ۳ـ۲ اکسید آهن با ساختار NaCl را نشان می‌دهد، تحت چه شرایطی این ساختار معیوب پایدار است؟ این اکسید آهن با اکسیدکردن قطعه‌ای از آهن در هوا در $1000°C$ تشکیل می‌شود. ترکیب این پوسته در امتداد ضخامت آن چگونه تغییر می‌کند؟

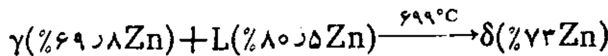
۲۲. دستور آزمایشی را بنویسید که تغییر آهن از فریت به‌استنیت را نشان دهد (این آزمایش برای تکرار باید برگشت‌پذیر وقابل نشان‌دادن به‌حاضرین در کلاس باشد.)

☐ ۲۳. واکنش



$$S_1 + L_3 \xrightarrow{\text{سرد کردن}} S_2$$

با اوتکتیك تفاوت دارد و واکنش پریتکتیك نامیده می‌شود. اگرچه در این فصل در مورد آن بحث نشد ولی واکنشی معمول است. مثلا، درسیستم Cu-Zn



$$\gamma(\%69{,}8Zn) + L(\%80{,}5Zn) \xrightarrow{699°C} \delta(\%73Zn)$$

واکنشهای پریتکتیك دیگری که در نمودارهای فازی این بخش آمده را ذکر کنید.

☐ ۲۴. سؤال ۲۳ را بخوانید. واکنش پریتکتویید مشابه آن است با این تفاوت که فقط شامل فازهای جامد است. در سیستم Al-Cu یا سیستم Al-Mg واکنش پریتکتویید را تعیین کنید، و رابطه‌ای بنویسید که درآن فازها و ترکیبات ذکر شده باشد.

☐ ۲۵. «قانون فازها» برای فشار ثابت به‌صورت زیر است

$$V = C + 1 - P$$

که در آن $P$ تعدادفازهای موجود، $C$ تعداد اجزا و $V$ تعداد متغیرهایی است که بدون تغییر $P$ وجود خواهد داشت. با استفاده از مثال ۹ـ۲ـ۳ قاعدهٔ فازها را نشان دهید.

☐ ۲۶. نمودارفازی‌شرایط تعادل را ارائه‌می‌دهد. ولی فرض کنید که آلیاژ 90Al-10Mg از $600°C$ سریعاً سرد شود. این امر چگونه برترکیب فازها اثر می‌گذارد؟ اگر از $400°C$ سرد شود چطور؟

## مسائل

۹ـ۱ـ۱ شربتی از مقادیر مساوی آب و شکر درست شده است. ۱۰۰ گرم از این شربت در $80°C$ چندگرم دیگر شکر را می‌تواند درخود حل کند؟

جواب: ۱۳۸ گرم دیگر

**۹-۱-۲** لحیم سرب- قلع مذابی، ترکیب اوتکتیك دارد. پنجاه گرم از آن تا $200^\circ C$ گرم شده؛ چند گرم قلع در این لحیم قابل‌حل است؟

**۹-۱-۳** لحیم $90Pb-10Sn$ بـا افزایش بیشتر قلع در $200^\circ C$ ذوب می‌شود. کمترین مقدار قلعی که باید به ۱۰۰ گرم از این لحیم غنی از سرب اضافه شود چقدر است؟

جواب: ۱۰۴٫۵ گرم قلع اضافی

**۹-۱-۴** یك تن نمك (NaCl) پس از یك طوفـان زمستانی در خیابانها پاشیده شده است. دما $-15^\circ C$ ($5^\circ F$) است. چندتن یخ توسط این نمك ذوب می‌شود؟

**۹-۱-۵** الف) هشت گرم نمك (NaCl) به ۳۲ گرم یخ اضافه می‌شود. کمینهٔ دما برای آنکه یخ کاملا ذوب شود چقدر خـواهد بود؟ بیست گرم دیگر یخ به‌آب‌نمك بـالا اضافه می‌کنیم. کمینهٔ دما برای آنکه یخ کاملا ذوب شود چقدر است؟

جواب: الف) $-17^\circ C$ ($1.5^\circ F$)     ب) $-10^\circ C$ ($14^\circ F$)

**۹-۱-۶** حدحلالیت روی در برنج $\alpha$ در $780^\circ C$، ۳۵٪ است. می‌خواهیم باذوب‌کردن مقداری برنج ۱۵-۸۵ و مقداری روی، ۱۰۰ کیلوگرم برنج ۳۵-۶۵ درست کنیم. چه‌مقدار از هرکدام باید در پاتیل ذوب شود؟

**۹-۲-۱** مفرغ $90Cu-10Sn$* به‌آهستگی از $1100^\circ C$ تا $20^\circ C$ سرد شده است. چه فازی (یا فازهایی) باادامهٔ سرد کردن به‌وجود خواهد آمد؟

جواب: $1100 \rightarrow 1020^\circ C$، L؛ $1020 \rightarrow 830^\circ C$، $(L+\alpha)$؛ $830^\circ C \rightarrow 340^\circ C$، $\alpha$؛ $340 \rightarrow 20^\circ C$، $(\alpha+\epsilon)$

**۹-۲-۲** برنج $65Cu-35Zn$* از $300^\circ C$ تا $1000^\circ C$ گرم‌می‌شود. پس از افـزایش هر $100^\circ C$ چه‌فازی (یا فازهایی) به‌وجود می‌آید.

**۹-۲-۳** آلیاژی حاوی $90Pb-10Sn$ است. الف) در $100^\circ C$، $200^\circ C$، و $300^\circ C$ چه فازهایی وجود دارد؟ ب) درچه گستره (یا گستره‌هایی) از دما فقط یك‌فاز وجود دارد؟

جواب: الف) $100^\circ C$، $\alpha+\beta$؛ $200^\circ C$، $\alpha$؛ $300^\circ C$، $\alpha$ (به‌مقدار کم) +L
ب) فقط $\alpha$، $150-270^\circ C$؛ فقط L بالای $305^\circ C$

**۹-۲-۴** مخلوط اوتکتیك $Al_2O_3$ و $ZrO_2$ در $2400^\circ C$ ذوب مـی‌شود. الف) در چه

---

* فهرست نمودارهای فازی قبل از سؤالات تشریحی آمده است. صفحهٔ ۴۵۰.

دمایی (یا دماهایی) فقط یک‌فاز وجود دارد؟ ب) دوفاز چطور؟ سه‌فاز چطور؟

**۹-۲-۵** خط انجماد را درنمودار Cu-Zn مشخص کنید. (شکل ۹-۵-۱ را ببینید.)

جواب: درست زیرتمام ناحیهٔ $x+L$ با خطوط افقی در °۹۰۳، °۸۳۵، °۶۹۹، °۵۹۸، و ۴۲۴°C قرار دارد.

**۹-۲-۶** خط ذوب و خط انجماد را کـه از ۱۵۳۸°C در ۱۰۰٪ Fe (٪۰O) و ۱۵۹۹°C برای $Fe_3O_4$ امتداد دارد مشخص کنید. (یادداشت: ۲ ناحیهٔ مایع وجود داردکه در آن فلز مایع از اکسید مایع جدا شده است.) (شکل ۹-۵-۵ را ببینید.)

**۹-۲-۷** مراحل تغییر فازها را هنگامی که ترکیب آلیاژی از ۱۰۰٪ Cu تا ۱۰۰٪ Al تغییر مـی‌کند، الف) در ۷۰۰°C، ب) در ۴۵۰°C، ج) در ۹۰۰°C حساب کنید. (شکل ۹-۵-۳ را ببینید.)

جواب: ج) در ۹۰۰ °C: $\alpha$، $\alpha+\beta$، $\beta$، $\beta+\gamma_1$، $\gamma_1$، $\gamma_1+\varepsilon_1$، $\epsilon_1$، $\epsilon_1+L$، L

**۹-۲-۸** الف) مراحل تغییرفاز را هنگامی که ترکیب آلیاژ در ۳۰۰°C از ۱۰۰٪Mg تا ۱۰۰٪ Al تغییر می‌کند، نشان دهید. ب) در ۴۰۰°C همین‌فـاز را تکرار کنید (شکل ۹-۵-۴ را ببینید).

**۹-۲-۹** بعضی از نـواحی نمودار Cu-Sn (شکل ۹-۵-۲) نـامگذاری نشده‌انـد. در ۶۲۵°C چه ناحیه‌هایی الف) بین $\beta$ و $\delta$، ب) بین $\gamma$ و $\zeta$ قرار می‌گیرد؟

جواب: از دنبالهٔ ... ۲-۱-۲-۱ استفاده کنید تا جواب را بیابید.

**۹-۲-۱۰** درنمودار Al-Cu (شکل ۹-۵-۳) چه ناحیه‌هایی درطرف راست $\gamma_2$ قرار می‌گیرند؟

**۹-۳-۱** بامراجعه به‌شکل ۹-۵-۴، در ۵۰۰°C حـد حلالیت منیزیم الف) در جامد $\alpha$ ب) در مایع، چقدر است؟ ترکیب شیمیایی فاز(هـا) در آلیاژ ۴۰ Al-۶۰Mg در ۵۰۰°C چیست؟ د) در آلیاژ ۸۰ Mg-۲۰ Al چطور؟

جواب: الف) ٪۱۱ Mg ب) ٪۷۶ Mg ج) مایع: ۴۰Al-۶۰ Mg
د) مایع: ۲۴ Al-۷۶ Mg؛ $\epsilon$: ۷ر۵ Al-۹۲ر۵ Mg

**۹-۳-۲** بامراجعه‌به‌شکل ۹-۲-۲، در ۲۰۰۰ °C، حد حلالیت $Al_2O_3$ الف) در مایع، ب) در $\beta$، چقدراست؟ ج) ترکیب‌شیمیایی فاز(ها) درسرامیك $20Al_2O_3-80ZrO_2$، در ۱۸۰۰°C چیست؟ در ۲۰۰۰°C چطور؟

**۹-۳-۳** ترکیب شیمیایی فاز(ها) در مسئلهٔ ۹-۲-۲ چیست؟

جواب: °۳۰۰، °۴۰۰، °۵۰۰، °۶۰۰، °۷۰۰: $\alpha$ (۶۵ Cu–۳۵ Zn)؛ ۸۰۰°C: $\alpha$ (۶۶ Cu–۳۴ Zn) و $\beta$(۶۱ Cu–۳۹ Zn)؛ ۹۰۰°C: $\alpha$ (۶۷٫۵ Cu–۳۲٫۵ Zn) و $\beta$(~۶۳ Cu–۳۷ Zn)؛ ۱۰۰۰°C: مایع (۶۵ Cu–۳۵ Zn)

۹ـ۳ـ۴ ترکیب شیمیایی فاز(ها) در مسئلهٔ ۹ـ۲ـ۱ چیست؟

**۹ـ۳ـ۵** الف) واکنش اوتکتیك را بـرای یکی‌از دو اوتکتیك سیستم Al–Cu (شکـل ۹ـ۵ـ۳) بنویسید؛ (ب) برای اوتکتیك دوم تکرار کنید.

جواب: الف) مایع (%۹۱٫۵ Cu) $\overset{۱۰۳۵°}{\rightleftarrows}$ $\alpha$(%۹۲٫۵ Cu)+$\beta$(%۹۰Cu)

**۹ـ۳ـ۶** در سیستم Al–Mg (شکل ۹ـ۵ـ۴) واکنش اوتکتیك را برای اوتکتیکی کـه منیزیم بیشتری دارد بنویسید.

۹ـ۴ـ۱ آلیاژ ۹۰Al–۱۰Mg ذوب و سپس آهسته سرد می‌شود؟ الف) درچه دمـایی اولین جـامد پدیدار می‌شود؟ ب) درچـه دمایی ۲/۳ مـایع و $\alpha$ ۱/۳ دارد؟ ج) درچه دمایی ۱/۲ مایع و $\alpha$ ۱/۲ دارد؟ د) برای $\alpha$%+۹۹ ومقدار ناچیزی مایع چطور؟

جواب: الف) ۶۲۰°C؛ ب) ۶۰۰°C؛ ج) ۵۸۵°C؛ د) ۵۲۰°C

۹ـ۴ـ۲ مسئلهٔ ۹ـ۴ـ۱ را برای آلیاژ ۱۰Al–۹۰Mg تکرار کنید.

**۹ـ۴ـ۳** چه‌ترکیبی از Ag و Cu دارای‌ترکیبات زیراست؟ الف) $\alpha$۱/۴ و $\beta$۳/۴ در ۶۰۰°C. ب) ۱/۴ مایع و $\beta$۳/۴ در ۸۰۰°C.

جواب: الف) ۲۶ Ag–۷۴ Cu ب) ۲۳ Ag–۷۷ Cu

۹ـ۴ـ۴ چـه‌ترکیبی از $Al_2O_3$ و $ZrO_2$ دارای ترکیبات زیر است؟ الف) $\alpha$ ۳/۴ و $\beta$ ۱/۴ در ۱۸۰۰°C. ب) ۳/۴ مایع و $\beta$ ۱/۴ در ۱۹۵۰°C.

**۹ـ۴ـ۵** حلالیت قلع درسرب جامد در ۲۰۰ °C، ۱۸ Sn% است. حلالیت سرب در فلز مذاب درهمان دما ۴۴ Pb% است. ترکیب آلیاژی حاوی ۴۰%مایع و ۶۰% جامد $\alpha$ در ۲۰۰°C چیست؟

جواب: ۶۶٫۸ Pb%، ۳۳٫۲ Sn%

۹ـ۴ـ۶ الف) درچه‌دمایی آلیاژ مونل (۷۰% نیکل، ۳۰% مس) حاوی ۲/۳ مایع و ۱/۳ جامد خواهد بود و ب) ترکیب مایع و جامد چه‌خواهد بود؟

۹ـ۴ـ۷ در مسئلهٔ ۹ـ۲ـ۱ فرض‌کنید ۱۵۰۰ گرم مفرغ مـوجود باشد. جرم فاز(هـای) جامد در فاصلهٔ هر ۱۰۰°C چقدر است؟

جواب: $1100°C$، صفر گرم؛ $1000°C$، $\sim 150\,g\,\alpha$؛ $800°C$، $400°C$، $1500\,g\,\alpha$؛ $300°C$، $\sim 1350\,g\,\alpha + 150\,g\,\epsilon$

۹-۴-۸ در $175°C$، چندگرم $\alpha$ در ۱ر۷ g لحیم Pb-Sn اوتکتیك وجود دارد؟

۹-۴-۹ در مسئلهٔ ۹-۲-۲، با $200\,g$ ترکیب ۶۵ Cu-۳۵ Zn، چندگرم $\alpha$ در هر دما وجود دارد؟

جواب: $300 \rightarrow 700°C$، $200\,g\,\alpha$؛ $800°C$، $180\,g\,\alpha$؛ $900°C$، $\sim 80\,g\,\alpha$؛ $1000°C$، $0\,g\,\alpha$

**۹-۴-۱۰** دو کیلو گرم نقرهٔ استرلینگ (۵ر۹۲ Ag-۵ر۷ Cu) از $1000°C$ تا $400°C$ بـه‌آهستگی سرد مـی‌شود. الف) روی منحنی درصد Ag (محور عرضهـا) برحسب °C (محور طولها) ترکیب $\alpha$ را بکشید؛ ب) روی منحنی مقدار $\alpha$ (محورطولها) برحسب °C (محور عرضها) مقدار $\alpha$ را بکشید. (داده‌های روی شکل ۹-۲-۴ دارای دقت ۱ قسمت در ۱۰۰ قسمت است. منحنی شما نیز به‌همین نسبت باید دقیق باشد.) ج) منحنی خود را تا $20°C$ برون‌یابی کنید.

۹-۴-۱۱ مقدار $\alpha$ را در ۸ر۱۵ kg آلیاژ ۹۵ Al-۵ Si به‌صورت تابعی از دما رسم کنید.

جواب: $0°C$، ۱۵kg؛ $576°C$، ۳ر۱۵ kg؛ $578°C$، ۱۱ kg؛ $600°C$، ۴ر۸ kg؛ $>620°C$، ۰kg

□ ۹-۴-۱۲ درچه دمایی آلیاژ ۶۰ Cu-۴۰ Ag می‌تواند حاوی ۵۵٪ $\beta$ باشد؟

۹-۵-۱ آلیـاژی از ۵۰ g Cu و ۳۰ g Zn ذوب و به آرامـی سرد شده است. الف) درچه دمایی ۴۰ g $\alpha$ و ۴۰ g $\beta$ مـوجـود خواهد بود؟ ب) ۵۰ g $\alpha$ و ۳۰ g $\beta$ چطور؛ ج) ۳۰ g $\alpha$ و ۵۰ g $\beta$ چطور؟

جواب: الف) $\sim 780°C$؛ ب) $750°C$؛ ج) $800°C$.

**۹-۵-۲** الف) ترکیب شیمیایی فازها در آلیاژ ۱۰٪ منیزیم-۹۰٪ آلومینیم در $600°C$، $400°C$، $200°C$ چیست؟ ب) مقادیر این فازها درهر دمای قسمت (الف) چقدر است؟ ج) برای توزیع منیزیم و آلومینیم در آلیاژ فوق در $600°C$، موازنهٔ مواد را بنویسید.

**۹-۵-۳** برای $P$ گرم آلیاژ ۹۲Ag-۸ Cu در $500°C$ (شرایط تعادل) موازنهٔ مواد را بنویسید.

جواب: ۹۳۸ر۰ $P$ g $\alpha$، ۹۸٪ Ag-۲٪ Cu؛ ۰۶۲ر۰ $P$ g $\beta$، ۱٪ Ag-۹۹٪ Cu

**۹-۵-۴** برای ۱۰۰ گرم آلیاژ ۹۰ Mg-۱۰ Al در $200°C$ (به‌فرض تعادل) موازنهٔ مواد را بنویسید.

**۹-۵-۵** آلیاژ ۹۵ Al-۵ Si که برای ریخته‌گری تحت فشار به مصرف می‌رسد طوری

سرد شده است که فلز حاوی $\alpha$ اولیه (پرواوتکتیك) و مخلوط اوتکتیك $(\alpha+\beta)$ است. چه کسری ازقطعهٔ ریختگی، $\alpha$ اولیه است؟

۹-۵-۶ چه‌مقدار مولیت در آجر ($10\,kg$)٪۶۰ $SiO_2$–٪۴۰ $Al_2O_3$ در شرایط تعادل در دماهای زیر موجود خواهد بود: الف) $1400°C$؟ ب) $1580°C$؟ ج) $1600°C$؟

۹-۵-۷ الف) ترکیب آلیاژ Al–Si راکه حاوی ۱/۳ مایع و ۲/۳ جامد است، در $600°C$ و در شرط تعادل معین کند؛ ب) ترکیب شیمیایی مایعات را بنویسید.

جواب: الف) ۹۶ Al–۴ Si و ۲۹ Al–۷۱ Si؛ب) ۹۱ Al–۹ Si، ۸۶Al–۱۴ Si

۹-۵-۸ براساس شکلهای ۹-۱-۳ و ۹-۴-۲ برای آلیاژی حاوی Pb ٪۸۰ و Sn ٪۲۰ شکلی بکشید که الف) کسر مقدار مایع را برحسب دما نشان دهد؛ ب) نسبت $\alpha$ را برحسب دما و ج) کسر $\beta$ را برحسب دما نمایش دهد.

۹-۵-۹ الف) درصد Cu را درفاز $\alpha$ نقرهٔ استرلینگ (۹۲٫۵ Ag–۷٫۵ Cu) برحسب دما رسم کنید؛ ب) کسر $\alpha$ را درنقرهٔ استرلینگ برحسب دما بکشید.

۹-۵-۱۰ روی کاغذ رسم، نمودار فازی آلیاژی از فلزات A و B را از روی داده‌های زیر رسم کنید. تمام نواحی نمودار خود را نامگذاری کنید.

| | |
|---|---|
| نقطهٔ ذوب A | $700°C$ |
| نقطهٔ ذوب B | $1000°C$ |
| دمای اوتکتیك | $500°C$ |
| ترکیب مایع در حالت تعادل دردمای اوتکتیك | ۳۰ w/o A و ۷۰ w/o B |
| حلالیتها در $500°C$: | ۱۵ w/o = A در B |
| | ۲۰ w/o = B در A |
| حلالیتها در $70°C$: | ۱۵ w/o = A در B |
| | ۸ w/o = B در A |

۹-۵-۱۱ شصت کیلوگرم از مفرغ ۹۰ Cu–۲۰ Sn (که قرار است ازآن زنگی ساخته شود) ذوب و سپس خیلی‌آهسته سرد شده است تا تعادل برقرار باشد. الف) درچه دمایی اولین جامد پدیدار می‌شود؟ ب) ترکیب جامد چیست؟ ج) درچه دمایی مقدار جامد دو برابر مقدار مایع است؟ د) درچه دمایی آخرین مایع ناپدید می‌شود؟ ه) ترکیب آن مایع چیست؟ و) چه‌فازی (یافازهایی) در $600°C$ وجود دارند. ترکیب ومقدار هر فازرا معین

کنید. ز) چه‌فاز (یافازهایی) در $۳۰۰^\circ C$ وجود دارد. ترکیب‌ومقدار هرفاز رابنویسید.

**۹-۵-۱۲** یك کیلو گرم نقرۀ استرلینگ حاوی ۷۵ گرم مس (۹۲۵ گرم نقره) است. روشی برای به‌دست‌آوردن حداقل ۱۰۰ گرم نقره با ۲%> مس از آلیاژ فوق‌پیشنهاد کنید. از ذوب‌کردن، انجماد مرحله‌ای و مراحل جداسازی استفاده‌کنید. (می‌توانید خط ذوب وخط انجماد را به‌صورت خطوط مستقیم فرض کنید.)

**۹-۶-۱** بیشینۀ حلالیت کربن در فریت ($\alpha$) برابر ۰٫۰۲ w/o است. به‌ازای هر اتم کربن چه تعداد سلول واحد وجود دارد؟

جواب: ۵۴۰

**۹-۶-۲** چگالی کاربید آهن ۷٫۶ $Mg/m^3$(۷٫۶ $g/cm^3$ =) است. حجم سلول واحد مکعب مستطیل‌که دربخش ۹-۶ شرح داده شده چقدر است؟

**۹-۶-۳** در $۹۲۰^\circ C$، بیشینۀ حلالیت کربن در استنیت ($\gamma$) برابر ۱٫۳۳w/o است. به‌ازای هراتم‌کربن چه تعداد سلول واحد وجود دارد؟

جواب: ۴٫۰

**۹-۶-۴** براساس داده‌های شکل ۱-۳-۱ و مثال ۳-۴-۱، منحنی تقریبی حجم-دما را برای آهن بین $۰^\circ C$ و $T_m$ رسم کنید. اگر لازم است تخمینی بزنید، فرضیات خود را بنویسید.

**۹-۷-۱** با استفاده از نمودار $Fe-Fe_3C$، کسر $\alpha$ و کسر کاربید موجود را در $۷۰۰^\circ C$ در فلزی‌که حاوی ۲% کربن و ۹۸% آهن است محاسبه‌کنید.

جواب: ۰٫۳۰ کاربید، ۰٫۷۰ فریت

**۹-۷-۲** الف) چه‌فازهایی در فولاد ۰٫۲C-۹۹٫۸Fe در $۸۰۰^\circ C$ موجود است؟ ب) ترکیب آنها را بنویسید. ج) نسبت هریك چقدر است؟

**۹-۷-۳** تغییرات‌فازی به‌وجود آمده براثر گرم‌کردن فولادکربنی ۰٫۲۰% از دمای‌اتاق تا $۱۲۰۰^\circ C$ را شرح دهید (فریت، $\alpha$؛ استنیت، $\gamma$؛ کاربید، $\bar{C}$.)

جواب: RT→$۷۲۷^\circ C$ $(\alpha+\bar{C})$؛ $۷۲۷^\circ C$($\alpha$+کاربید+$\gamma$)؛

$۷۲۷\rightarrow۸۵۵^\circ C(\alpha+\gamma)$

دراین‌حالت$\alpha$ درحال‌کاهش‌است و در $۸۵۵^\circ C$ به‌صفرمی‌رسد؛ فقط $\gamma$ C ۱۲۰۰←-۸۰۵

**۹-۷-۴** بدون مراجعه به‌نمودار فازی $Fe-Fe_3C$، ترکیب فازها را در مسئلۀ قبل معین کنید.

**۹-۷-۵** واکنش اوتکتویید سیستم $BaTiO_3-CaTiO_3$ (شکل ۹-۵-۷) را بنویسید.

جواب: $\beta(\%24CaTiO_3) \underset{}{\overset{105^\circ}{\rightleftarrows}} \alpha(\%20CaTiO_3) + \gamma(\%90\,CaTiO_3)$

**۹-۷-۶** الف) چهار اوتکتویید موجود در سیستم Cu-Sn (شکل ۹-۵-۲) را ذکر کنید؛ ب) در دومورد ازچهار مورد فوق واکنش را بنویسید.

**۹-۷-۷** بامراجعه به‌شکل ۹-۷-۳، کسر فازها را برای فولاد ۹۹Fe-۱C ارائه دهید.

**۹-۷-۸** مسئلهٔ قبل را برای فولاد ۲ر۰C-Fe ۸ر۹۹ تکرار کنید.

**۹-۸-۱** درصد فریت، کاربید، و پرلیت را در دمای اتاق در آلیاژ آهن-کربن حاوی الف) ۵ر۰٪کربن؛ ب) ۸ر۰٪کربن؛ و ج) ۵ر۱٪ کربن حساب کنید.

جواب: الف) ۵ر۷٪ کاربید، α ۵ر۹۲٪، ۶۲٪ پرلیت؛ ب) ۱۲٪ کاربید، α ۸۸٪، ۱۰۰٪ پرلیت؛ ج) ۵ر۲۲٪ کاربید، α ۵ر۷۷٪، ۸۸٪ پرلیت

**۹-۸-۲** الف) فازهای موجود، ترکیب هریك از این‌فازها، ومقدار نسبی هرفاز را برای فولاد ۲ر۱٪ کربن در $870^\circ C$، $760^\circ C$، $700^\circ C$ معین‌کنید. (به‌فرض برقراری تعادل.) ب) درهریك از دماهای فوق چه‌مقدار پرلیت وجود دارد؟

**۹-۸-۳** به‌فرض برقراری تعادل، برای فولاد ۵ر۰C-Fe ۵ر۹۹ مقادیر زیر را تعیین کنید. الف) کمترین دما برای γ ۱۰۰٪؛ب) کسر مقدار γ در $730^\circ C$ و ترکیب آن؛ج) کسر مقدار پرلیت در $720^\circ C$ و ترکیب کلی آن؛د) کسری از آنکه در $730^\circ C$ فریت پرواوتکتویید است؛ه) کسری ازآنکه پس از سردشدن از $730^\circ C$، در $720^\circ C$ فریت پرواوتکتویید است.

جواب: الف) $780^\circ C$؛(ب، ج) ۶ر۰ در تقریباً ۸ر۰٪C(۲ر۹۹٪Fe)؛(د، ه) ۴ر۰ در ۰۲ر۰٪C

**۹-۸-۴** ۹۹Fe-۱C را جانشین فولاد مسئلهٔ قبل‌کرده سپس آن را حل‌کنید.

**۹-۸-۵** الف) مقدارپرلیت را در آلیاژ ۹ر۰C-Fe ۱ر۹۹ که از $870^\circ C$ به‌آهستگی سرد شده‌است معین‌کنید. مبنا: ۱۱ کیلوگرم آلیاژ؛ب) از نتایج قسمت (الف) مقدارفریت و کاربید را در $725^\circ C$ معین‌کنید؛ ج) در $20^\circ C$ نیز این مقادیررا بیابید.

جواب: الف) ۸ر۱۰kg؛ ب) ۵ر۹kgα، ۲۵ر۱kg$\bar{C}$؛ ج) ۵ر۹kgα، ۵ر۱kg$\bar{C}$

**۹-۸-۶** براساس مطالب این‌فصل برای سپراتومبیل فولاد پرکربن را انتخاب می‌کنید یا فولاد کم کربن را؟ دلایل آن را بنویسید.

**۹-۹-۱** فولادی ترکیب زیر را دارد. عدد AISI-SAE آن را معین کنید: ۲۱ر۰C،

۰ر۶۹Mn، ۰ر۶۲Cr، ۰ر۱۳Mo، ۰ر۶۱Ni.

جواب: AISI ۸۶۲۰

**۹-۹-۲** فولادی ترکیب زیر را دارد. عدد AISI–SAE آن را معین کنید: ۰ر۳۸C، ۰ر۷۵Mn، ۰ر۸۷Cr، ۰ر۱۸Mo، ۰ر۰۳Ni.

**۹-۹-۳** مقادیر کسری فاز(ها) را در ۷۰۰°C، ۷۵۰°C، ۸۰۰°C و ۹۰۰°C برای فولادهای زیر حساب کنید. الف) ۹۹ر۲Fe–۰ر۸C؛ ب) ۹۸ر۸Fe–۱ر۲C؛ □ (ج) ۹۸ر۸Fe–۰ر۶Mo–۰ر۶C.

جواب: الف) ۷۰۰°C، ۰ر۱۲$\bar{C}$–۰ر۸۸$\alpha$؛ ۷۵۰°C، ۸۰۰°C، ۹۰۰°C، ۱ر۰ $\gamma$ ب) ۷۰۰°C، ۰ر۱۸$\bar{C}$–۰ر۸۲$\alpha$؛ ۷۵۰°C، ۰ر۰۶$\bar{C}$–۰ر۹۴$\gamma$؛ ۸۰۰°C، ۰ر۰۳۵$\bar{C}$–۰ر۹۶۵$\gamma$؛ ۹۰۰°C، ۱ر۰ $\gamma$ ج) ۷۰۰°C، ۷۵۰°C، ۰ر۰۹$\bar{C}$–۰ر۹۱$\alpha$؛ ۸۰۰°C، ۰ر۰۱$\bar{C}$–۰ر۹۹$\gamma$∼؛ ۹۰۰°C، ۱ر۰ $\gamma$ ($\bar{C}$ = کاربید.)

□ **۹-۹-۴** شکل ۹-۷-۳ را برای فولادی حاوی الف) ۱٪Mn؛ ب) ۱٪Cr؛ ج) ۱٪Ni شرح دهید. (منحنی جدید حلالیت تقریباً به‌موازات منحنی قبلی می‌ماند.)

□ **۹-۹-۵** چه‌مقدار نیکل باید به‌فولاد اضافه شود تا انتهای پایینی گسترهٔ پایداری استنیت تا ۰ر۴۰٪ کربن، همان‌قدر، که با ۲٪Mn کاهش می‌یابد، پایین آید.

جواب: تقریباً ۲ر۲٪Ni

# ۱۰

## مواد چندفاز: میکروساختارها

### چشم‌انداز فصل

نمودارهای فازی فصل ۹، پایه‌ای کمی برای ترکیب و مقادیر فازها به‌دست داد. فرض شد که تعادل برقرار باشد. در مورد زمان لازم برای رسیدن به‌تعادل یا میکروساختارهای به‌دست‌آمده مطالب چندانی ارائه نشد. این فصل به این مطالب می‌پردازد.

ابتدا واکنشهای حالت جامد را براساس تعداد فازهای موجود، میزان نوآرایی اتمی، و اطلاحات ترکیبی لازم طبقه‌بندی می‌کنیم. سپس به‌هندسهٔ میکروساختارها توجه خواهیم کرد. این امر ارتباط‌دادن خواص به‌میکروساختارها را ممکن می‌سازد.

## هدف از مطالعه

۰۱ درك واكنشهای اصولی‌كه ساختار داخلی مواد جامد را تغییر می‌دهند.

۰۲ به‌كاربردن روابط آرنیوس درمورد واكنشهایی‌كه به‌وسیلهٔ نفوذ محدود می‌شوند و درك كیفی علت به‌تأخیر افتادن واكنشها درهنگامی كه فازهای جدید باید جوانه بزنند.

۰۳ تفاوت قائل‌شدن بین شرایطی كه موجب به‌وجود آمدن واكنشهایی در مرزدانه‌ها و در داخل دانه‌ها می‌شود.

۰۴ مربوط‌كردن خواص مكانیكی به‌تغییرات میكروساختاری، مثل مقدار، اندازه، شكل، و توزیع فازها.

۰۵ مربوط‌كردن خواص‌فیزیكی مهم، از نظر كیفی به‌تغییرات‌میكروساختاری.

## ۱۰-۱ واكنشهای فازجامد

تمام تغییرات میكروساختاری جامدات شامل نوآرایی اتمهاست. ابتدا دربخش ۶-۶ هنگام بررسی تبلور مجدد با تغییرات میكروساختاری مواجه شدیم. تبلور مجدد واكنشی بسیار ساده در حالت جامد است زیرا تغییر تركیب شیمیایی درآن صورت نمی‌گیرد. همچنین‌ساختار بلوری به‌همان‌شكل‌باقی می‌ماند و هراتم همان كوئوردیناسیون اتمی سابق را خواهدداشت. مثلا درصورتی‌كه fcc باشد عدد كوئوردیناسیون ۱۲ خواهد بود. ولی اتمها برای ساختن بلورهای كاملتری از دانه‌های تغییرشكل یافتهٔ قبلی نوآرایی می‌كنند. این امر فورا صورت نمی‌گیرد. زمان لازم تابعی از دما و سایر متغیرهاست. (به‌شكلهای ۶-۶-۳ و ۶-۶-۴ رجوع كنید.)

واكنشهایی كه در جامدات صورت می‌گیرند را می‌توان به‌راههای مختلف طبقه‌بندی كرد. دراینجا این‌كار به‌صورت زیر انجام شده است:

۰۱ رشد دانه‌ها. عبور اتمها از مرزدانه‌ها ($\ll$۱ nm)؛ بدون تغییر درتركیب و ساختار بلوری؛ بدون ایجاد دانه‌های جدید.

۰۲ تبلور مجدد. دانه‌های‌جدید و كاملتر؛ فقط نوآرایی اتمی موضعی؛ ($\ll$۱ nm)؛ بدون تغییر درتركیب ساختار بلوری.

۰۳ تغییرات چندشكلی. فاز جدید و بنابراین كوئوردیناسیون اتمی جدید به‌همراه نوآرایی موضعی ($\ll$۱ nm)؛ بدون تغییر در تركیب.

۰۴ الف) حل‌شدن. ناپدید شدن فاز موجود با حل‌شدن درفاز اولیه؛ نفوذ اساسی اتمها ($\gg$۱ nm).

۰۴ ب) رسوب. جدا شدن فازجدید از محلول جامد فوق اشباع شده، نفوذ اساسی اتمها ($\gg$۱ nm).

۵. **واکنشهای اوتکتویید.** تجزیهٔ یك فاز (درحین سردشدن) به دوفـاز جدید، نفوذ اساسی اتمها ($\gg$ ۱ nm).

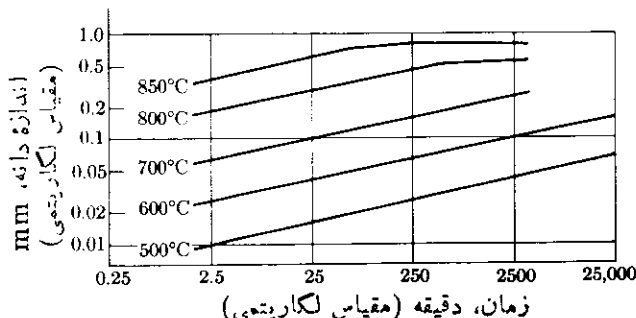
۶. **تبدیل‌مارتنزیتی.** تغییر چندشکلی با برش یك یا چندصفحهٔ اتمی نسبت به‌صفحات مجاور؛ بدون نفوذ ($\ll$ ۱ nm).

این فهرست شامل تمام موارد نیست ولی می‌توان آن را پایه‌ای دانست برای درك‌عملیات گرمایی مختلف (فصل ۱۱) و میکروساختارهای حاصل و خواص آنها.

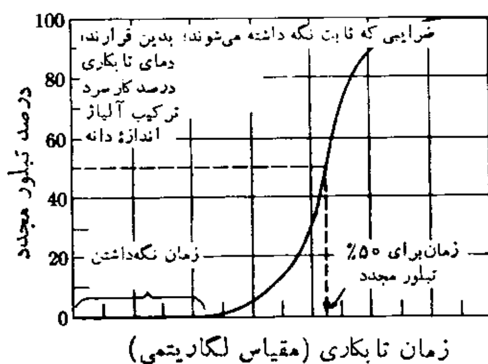
نکات برجستهٔ فهرستهای بالا بدین قرارند: (۱) آیا فازجدید تشکیل شده است یا خیر و (۲) آیا حرکت اتمی فقط شامل نوآرایی موضعی اتمهاست ($\ll$ ۱ nm) یا شامل نفوذ پردامنه در فواصل چندسلول اتمی می‌شود ($\gg$ ۱ nm).

**رشد دانه‌ها (مواد تك فاز).** این واکنش، که در بخش ۶ـ۷ مـوردبحث قرار گرفت، به‌زمانی برای‌جوانه‌زنی نیاز ندارد زیرا اتمها در عرض‌مرزدانه از دانه‌ای که قبلا وجود داشته به‌دانهٔ دیگر حرکت مـی‌کنند. سرعت واکنش به‌دما حساس‌است (شکل ۱۰ـ۱ـ۱)، زیرا برای فعالسازی پرش اتمها، انرژی گرمایی لازم است، و نیز تابعی از انحنای مرز دانه است؛ بنابراین بارشد دانه‌ها سرعت واکنش کاهش می‌یابد.

**تبلور مجدد.** اگر چه ازاین واکنش فـاز جدیدی به‌وجود نمی‌آید ولی تأخیری صورت می‌گیرد، زیرا دانه‌های جدید باید جـوانه بزنند. دانه‌های جدید معمولا ابتدا در امتداد نواحی‌لغزشی دردانه‌هایی‌که قبلا تغییرشکل یافته‌اند، تشکیل می‌شوند[شکل ۶ـ۶ـ۱(ب)]. پیشرفت واکنش‌تبلور مجدد معمولا‌طبق منحنی S شکل، یا منحنی دوخمه صورت می‌گیرد. (شکل ۱۰ـ۱ـ۲). مثلا آلومینیم (خالص تجارتی و تا ۵٪ سرد کاری شده) در ۳۱۰°C در ۵۰ ساعت اول دارای تبلورمجدد قابل اغماضی است [شکل ۱۰ـ۱ـ۳ (الف)]، ولی پس‌از کلا ۷۰ ساعت تـا ۵۰٪ تبلور مجدد پیدا می‌کند [شکل ۱۰ـ۱ـ۳ (ب)]. تکمیل نهایی تقریباً به ۱۰۰ ساعت نیاز دارد.



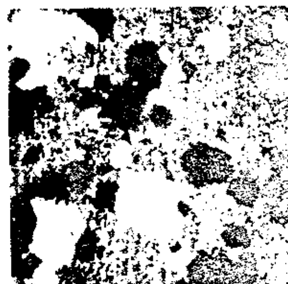

**شکل ۱۰ـ۱ـ۱** رشددانه (برنج). رشد لگاریتمی ادامه می‌یابد تا ابعاد دانه‌ها به‌ابعاد نمونهٔ فلز، به‌ضخامت ۱ mm ، نزدیك شود.



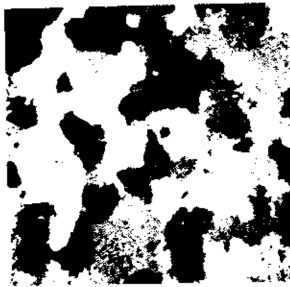

**شکل ۱۰-۱-۲** تبلور مجدد همدما.



(الف) گرم‌شده به‌مدت ۵۰ ساعت



(ب) ۷۰ساعت



(ج) ۸۰ساعت



(د) ۱۰۰ ساعت

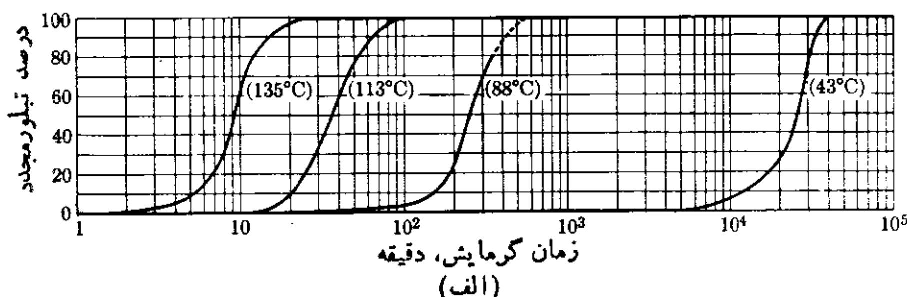
**شکل ۱۰-۱-۳** پیشرفت تبلور مجدد همدما در ۳۱۰°C (۵۹۰°F) برای آلومینیم (۹۹ر۹۵٪) که۵٪ سردکاری شده است. مدت گرم کردن الف) ۵۰ ساعت؛ ب) ۷۰ ساعت؛ ج) ۸۰ ساعت؛ د) ۱۰۰ ساعت، (بزرگنمایی ۷ر۵).

پیشرفت تبلور مجدد به‌همین ترتیب در دماهـا، ولی در زمـانهای متفاوت صورت می‌گیرد [(شکل ۱۰-۱-۴ (الف)]. تبلور مـجدد مس فوق‌العاده خـالص (۹۹٫۹۹۹٪) که (۹۸٪) سردکاری شده در همان شکل دیده می‌شود. می‌بینید که زمان لازم برای تبلور مجدد به‌میزان ۵۰٪، نسبتاً به‌سادگی مشخص شده است زیرا واکنش در آن نقطه بیشترین سرعت را دارد. وقتی زمان این نقطه از واکنش را به‌دمـای تبلور مجدد مربوط می‌کنیم، رفتار آرنیوس را که انتظار داریم، مشاهده‌می‌کنیم [شکل ۱۰-۱-۴ (ب)]، زیرا حرکت اتمها در واکنش تأثیر می‌کند، که آن‌نیز به‌نوبهٔ خود به‌انرژی فعالسازی بستگی دارد.

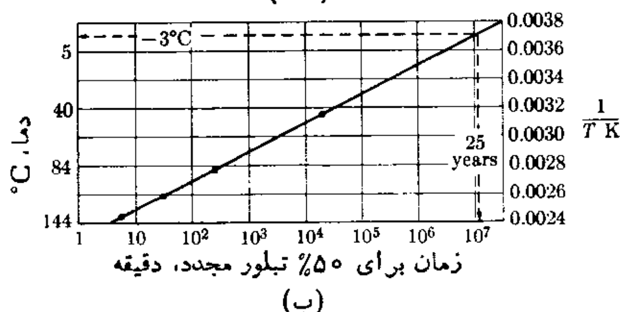
رابطهٔ ریاضی شکل ۱۰-۱-۴ (ب) به‌صورت زیر است

$$\ln t = C + \frac{B}{T} \qquad (۱۰-۱-۱)$$

که در آن $C$ و $B$ ثابتهـای رابطه‌اند. مـی‌توانیم این رابطه را بـه روابط (۴-۷-۴) و (۱-۸-۸) مربوط‌کنیم به‌شرط آنکه تشخیص دهیم که سرعت زیاد واکنش $R$ (در زمـان کم، زیرا $R = ۱/t$) به‌نفوذ سریع بستگی دارد. بنابراین




(الف)




(ب)

**شکل ۱۰-۱-۴** تبلور مجددهمدمای مس‌خالص ۹۹٫۹۹۹٪.الف) تبلور مجددهمدمای مس خالص‌که ۹۸٪ سردکاری شده؛ ب) برای برون‌یابی از داده‌های چهارمنحنی قسمت (الف) استفاده کنید.

$$\ln R = \ln R_{\circ} - \frac{E}{kT} = -\ln t \qquad (۲-۱-۱۰)$$

که در آن $C$ و $B$ دررابطهٔ (۱۰-۱-۱) به‌ترتیب $-\ln R_{\circ}$ و $E/k$ هستند (مثال ۶-۶-۲ را نیز ببینید).

**واکنشهای چند شکلی.** مواد خالص ممکن است از یك شکل به شکل دیگر فازی تبدیل شوند

$$\text{فاز } A \rightleftarrows \text{ فاز } \mathcal{A} \text{ : واکنش چندشکلی} \qquad (۳-۱-۱۰)$$

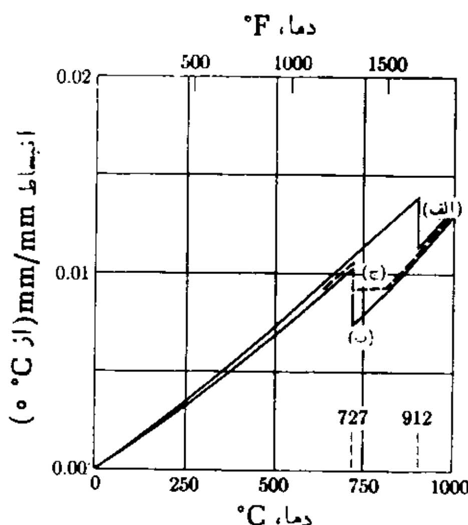
الگوی اولیه برای این واکنش که دربخش ۹-۶ بررسی شد تبدیل $\alpha \rightleftarrows \gamma$ آهن در $۹۱۲^{\circ}C$ بود. مثالهای آشنای دیگر درمورد تغییرات چند شکلی عبارت است از تبدیل $\alpha$ به $\beta$ در تیتانیم و تبدیل کوارتز به تریدایمیت و به‌کریستوبالیت در $SiO_2$. این تبدیلها معمولا از تغییر در دما به‌وجود می‌آیند. ولی تبدیل چندشکلی مانند آنکه بین گرافیت و الماس وجود دارد، نتیجهٔ تغییرات فشار است.

تبدیل‌فاز همراه با تغییرات چگالی و حجم‌است زیرا ساختارهای چندشکلی ،ضریب فشردگی اتمی یکسانی ندارند. برای آهن bcc و fcc ضریب فشردگی به‌ترتیب ۶۸ر۰ و ۷۴ر۰ است و بنابراین در $۹۱۲^{\circ}C$ تغییر ابعاد قابل‌ملاحظه‌ای وجود دارد [شکل ۱۰-۱-۵ (الف)]. با این‌حال برای اینکه این‌تغییر دقیقاً در دمای تبدیل وبدون تأخیر صورت‌گیرد باید گرم‌کردن یا سردکردن کاملا آهسته انجام شود.

بنابه‌تعریف، دمای تبدیل‌دمایی است که درآن دوفاز برای‌واکنش شیمیایی انرژی یکسانی‌دارند. بنابراین پایینتراز $۹۱۲^{\circ}C$ استنیت از فریت فعالتراست زیرا انرژی آزاد بیشتری دارد، یعنی استنیت ناپایدار و فریت پایدار است. بلافاصله بالای $۹۱۲^{\circ}C$ عکس آن صادق است؛ یعنی فاز پایدار آهن خالص، استنیت است زیرا آهن bcc به‌آهن fcc تبدیل می‌شود.

چون در واکنشهای چندشکلی ترکیب واکنشگر و محصول یکسان است معمولا این واکنشها به‌حرکات اتمی اندکی نیاز دارند (رابطهٔ ۱۰-۱-۳). با وجود این لازم‌است که پیوندهای موجود شکسته شود و اتمها به‌صورت ساختار جدیدی نوآرایی یابند.

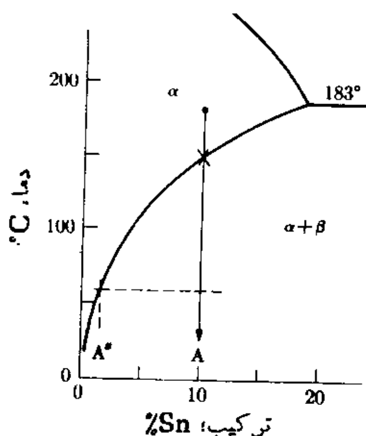
**حل شدن و رسوب‌کردن در جامدات.** این دو واکنش‌که درشکل ۱۰-۱-۶ رسم‌شده‌اند عکس‌یکدیگرند. پایینتر از دمای $۱۵۰^{\circ}C$ در آلیاژی با ۹۰٪Pb و ۱۰٪Sn دوفاز $\alpha$ و $\beta$ موجود است. بالای $۱۵۰^{\circ}C$ تمام قلع در $\alpha$ (fcc) است. درنتیجه اگر فلز گرم شود جامد $\beta$ درجامد $\alpha$ حل می‌شود و هرگاه پس‌از عمل حل شدن در بالای $۱۵۰^{\circ}C$ این آلیاژ تا ناحیهٔ دوفازی سرد شود، رسوب جامد به‌وجود می‌آید. این‌رسوب برای آلیاژهای‌مختلف پیرسختی‌مفیداست(فصل ۱۱). روابطی‌که خواهدآمد مربوط به‌این دو واکنش درآلیاژهای




**شکل ۱۰-۱-۵** تغییر ابعاد با تبدیلات فازی در آهن و آلیاژهای آهن-کربن. الف) آهن خالص؛ ب) $99.2Fe-0.8C$؛ ج) $99.6Fe-0.4C$، تبدیل فقط درصورتی در دمایی که در نمودار فازی تعیین شده است انجام می‌گیرد که دما بسیار آهسته تغییر کند و حالت تعادل پدید آید.

دوتایی‌اند. باید توجه کرد که در هر کدام از واکنشها فقط دوفاز شرکت دارند. ولی همین که آلیاژ از حد حلالیت بگذرد ترکیب محلول از A به $A^{\#}$ تغییر می‌کند (شکل ۱۰-۱-۶).

(۱۰-۱-۴) عمل حل شدن: جامد $A^{\#}$ + جامد B $\xrightarrow{\text{گرم کردن}}$ جامد A

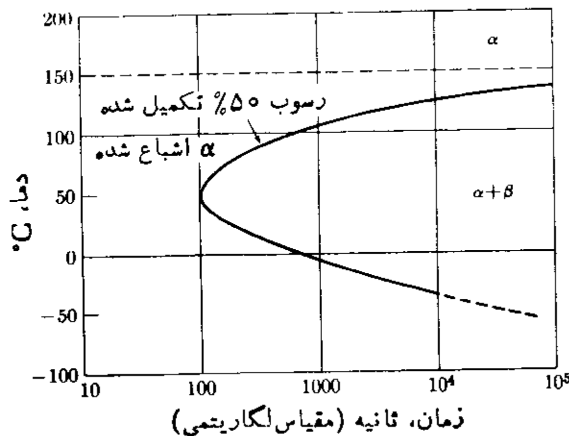



**شکل ۱۰-۱-۶** عمل حل‌شدن و رسوب کردن (آلیاژ $90Pb-10Sn$). در دماهای بالا تمام قلع در α حل می‌شود. سردشدن موجب واکنش رسوب جامد می‌شود.

$$\text{رسوب کردن: جامد A} \xrightarrow{\text{سرد کردن}} \text{جامد A + جامد B} \qquad (۱۰-۱-۵)$$

این واکنشها بـه‌نفوذ احتیاج دارند. مثلا ۹۵٫۵w/o Al و ۴٫۵ w/o Cu را درنظر بگیرید، که آلیاژ پرمصرف آلومینیم‌است. طبق شکل ۹-۵-۳ پایینتر از ۵۰۰°C (۹۳۰°F) دوفاز $\theta$ و $\kappa$ درحال تعادل‌اند. فاز $\theta$ را $CuAl_2$ تشکیل می‌دهد به‌طوری‌که کسر اتمهای مس درآن به‌مراتب بیشتراز $\kappa$ است. در حین‌عمل حل‌شدن اتمهای مس باید در ساختار $\kappa$ نفوذکنند تا به‌وضعیتهای جانشینی تصادفی برسند. به‌همین‌ترتیب هنگام‌رسوب کردن اتمهای مس باید روی ذرات $CuAl_2$ (یعنی $\theta$) که درحال رشدند جمع‌شوند.

اکنون بـه‌آلیاژ ۹۰ Pb-۱۰ Sn شکل ۱۰-۱-۶ برمی‌گردیم، زمـان لازم برای وقوع واکنش رسوب را درنظر می‌گیریم. بالای ۱۵۰°C، فقط $\alpha$ (غنی از Pb) پـایدار است؛ زیر ۱۵۰°C، در صورتی‌کـه زمان کافی باشد مقداری $\beta$ (غنی از Sn) از $\alpha$ فوق اشباع شده جدا خواهد شد. شکل ۱۰-۱-۷ زمان لازم برای رسوب همدما (تا ۵۰٪ کامل شده) را نشان می‌دهد که درآن آلیاژ سریعاً تا دمای برگزیده سرد شده سپس درآن دمـا نگه داشته می‌شود تـا رسوب به‌وجود آید. خواهیم دید که با افزایش دما از ۵۰°C- تا دمای اتاق، زمان لازم کاهش می‌یابد. دراین گسترهٔ دمـا، سرعت ایجاد رسوب، توسط نفوذ محدود می‌شود. در حدود ۵۰°C، الگوی ارائـه شده عکس می‌شود و مـدتها طول خواهد کشید تا به‌پایان نمودار، که زیرحد حلالیت ۱۵۰°C است، برسد. ازآنجاکه در سایر واکنشها نیز همین‌منحنی نوع C را خواهیم داشت‌باید به‌این تغییر جهت توجه‌داشته باشیم.

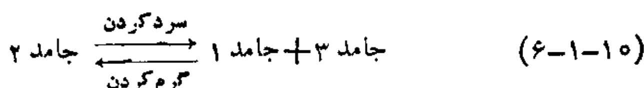



**شکل ۱۰-۱-۷** رسوب همدما (۹۰Pb-۱۰Sn). بـالای ۱۵۰°C، $\alpha$ حاوی تمـام قلع مـوجود است. سرعت ایجاد رسوب $\beta$ با مقدار موفق‌سرمایش زیر دمای اشباع تغییر می‌کند. در نهایت، تعادل شکل ۹-۱-۳ به‌دست می‌آید.

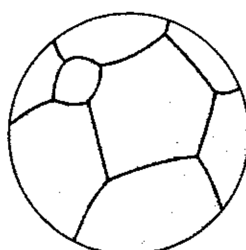
بالای زانوی منحنی رسوب همدما، سرعت به‌وسیلهٔ نفوذ محدود نمی‌شود، زیرا اتمها می‌توانند نسبتاً سریع نفوذ کنند (۵۰°C برابر تقریباً $T_m$۶ر۰ است). درعوض محدودیت این واکنش به‌علت زمان لازم برای جوانه‌زنی فاز جدید $\beta$ است. جوانه‌زنی در مرزدانه‌های $\alpha$ بسیار ساده‌تر صورت می‌گیرد [شکل ۱۰-۱-۸ (ب)]. اتمهای قلع از فواصل اتمی بسیاری عبور می‌کنند تا به‌این مکانها می‌رسند.

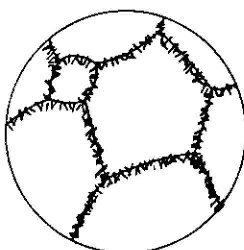
زیر زانوی منحنی رسوب همدما، سرعت ایجاد رسوب توسط نفوذ اتمهای قلع محدود می‌شود. اتمها نمی‌توانند به‌سادگی نفوذ کنند؛ علاوه براین فوق اشباع زیاد است. بنابراین ذرات جدید $\beta$ هرجا که ممکن باشد، اعم از عیوب نقطه‌ای مثل تهیجاییها و اتمهای بین‌نشین، درطول خطوط نابجایی، و در جوار ناخالصیها، جوانه می‌زنند. این امر درمیان دانه‌هاصورت می‌گیرد. بنابراین میکروساختار متفاوتی را می‌بینیم [شکل ۱۰-۱-۸ (ج) در مقابل شکل ۱۰-۱-۸ (ب)].

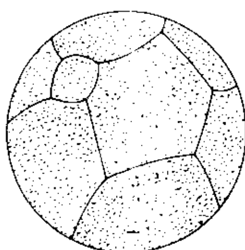
**واکنشهای اوتکتویید.** این واکنشها معمول‌اند. درحقیقت در سیستم Cu–Sn (شکل ۹-۵-۲) چهار اوتکتویید وجود دارد. دربعضی از نمودارهای فازی فصل ۹ نیز چند اوتکتویید وجود دارد. هریك از آنها واکنش عمومی زیر را دارد



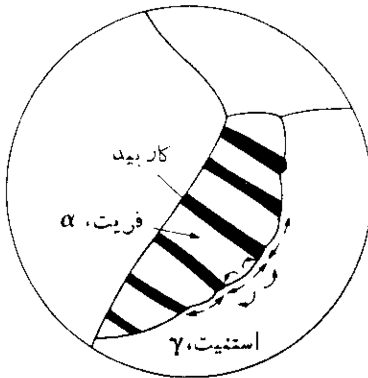

اگرجامد ۲ دارای ترکیب‌اوتکتوییدباشد، واکنش اوتکتویید در دمای معینی به‌نام دمای اوتکتویید صورت می‌گیرد. با سرد کردن، واکنشی صورت می‌گیرد که طی آن فازی که


(الف)


(ب)


(ج)

**شکل ۱۰-۱-۸** رسوب فاز جامد (طرحوار). الف) محلول جامد فوق اشباع شده، مثلا 90Pb–10Sn که از ۱۸۰°C تا ۲۰ °C به سرعت سردشده است؛ ب) رسوب در مرزدانه‌ها. این امر به‌نفوذ پردامنه به‌مرزدانه‌ها، جایی که جوانه‌زنی بسیارساده‌ترصورت می‌گیرد، نیاز دارد؛ ج) رسوب بین دانه‌ای. بسیاری از عیوب کوچکتر دانه‌ها موجب جوانی‌زنی فاز جدید می‌شوند؛ بنابراین فواصل نفوذ ساختار (ب) کوتاهتر است. اگر دمای رسوب بالا باشد ساختار (ب)، و اگر پایین باشد ساختار (ج) به‌وجود می‌آید.




**شکل ۱۰-۱-۹** تشکیل پرلیت. کربن باید از میان استنیت اوتکتویید (تقریباً ۸ر۰٪) نفوذ کند تا کاربید (۷ر۶٪) تشکیل دهد. فریت حاصل مقدار قابل اغماضی کربن دارد.

دارای ترکیب میانی است به دو فاز دیگر که ترکیبات آنها در دو طرف اوتکتویید است تبدیل می‌شود (رابطهٔ ۹-۷-۲).

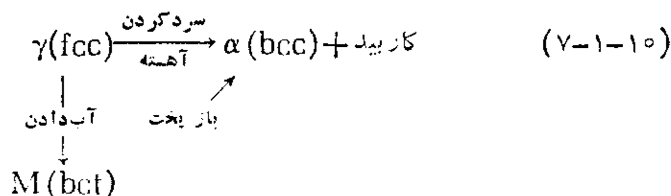
اگر جامد ۲ دارای ترکیب اوتکتویید نباشد ابتدا با یکی از دو منحنی حدحلالیت مواجه هستیم، به‌طوری که یکی از فازها قبل از دیگری شروع به جدا شدن مـی‌کند. (مثلا در آلیاژ Fe ۶ر۹۹-C ۴ر۰ فـریت قبل از کاربید جدا می‌شود؛ در آلیاژ Fe۹۹-C۱، طبق شکلهای ۹-۷-۳ و ۹-۸-۲ (و) ابتدا کاربید جدا می‌شود.)

الگوی اولیه برای واکنش اوتکتویید، تجزیهٔ همدمای استنیت (بخش ۹-۸) است. زمان لازم برای این تجزیهٔ همدما در بخش ۱۱-۴ بررسی خواهد شد. درآنجـا منحنی نوع C، کـه شبیه به‌منحنی رسوب همدمـای ۱۰-۱-۷ است، را برای آلیاژ Pb-Sn خواهیم دید، ومکانیسم رشد پرلیت را موردتوجه قرار خواهیم داد.

رشد پرلیت بـا تشکیل همزمان فریت، α، و کـاربید $\bar{C}$ همراه است. این رشد در مرزدانه‌های استنیت آغاز می‌شود. لایه‌های دوفاز به‌سمت‌داخل رشد می‌کنند. با وقوع این عمل کربن‌باید طبق شکل ۱۰-۱-۹ جدا شود. اگر سرعت سردکردن آهسته باشد، کربن می‌تواند تا فاصلهٔ بیشتری نفوذکند و پرلیت درشت (با لایهٔ ضخیمتر) تشکیل می‌شود. اگر سرعت سرد کردن شتاب گیرد، نفوذ به‌فاصلهٔ کوتاهتری محدود می‌شود. در نتیجه لایه‌های بیشتر (و نازکتری) تشکیل می‌شوند که پرلیت ریز را به‌وجود می‌آورند.

طبق شکل ۹-۸-۲ باافزایش مقدار کربن از ۰٪ تا ترکیب اوتکتویید (۸ر۰٪ ~ در فولادهای کربنی ساده) مقدار پرلیت می‌تواند از هیچ به ۱۰۰٪ تغییر کند و نیز کاهشی در مقدار فریت پرواوتکتویید به‌وجودمی‌آید. مقدار پرلیت درفولادهای هیپراوتکتویید کاهش می‌یابد زیراکاربیدپر و اوتکتویید دراطراف دانه‌های اولیهٔ استنیت شبکه‌ای تشکیل می‌دهد.

**تشکیل مارتنزیت.** طبق رابطـهٔ (۹-۸-۱)، استنیت بـه‌فریت و کاربید (α+C) تجزیه می‌شود و این درصورتی‌است که به‌کربن زمان کافی داده‌شود که از نواحی فریت به‌کاربید نفوذ کرده، در فاز کاربید متمرکز و از فریت تهی شود. اگر استنیت با سرعت زیاد آب داده شود رابطهٔ (۹-۸-۱) را می‌توان به‌صورت‌زیر تغییر داد

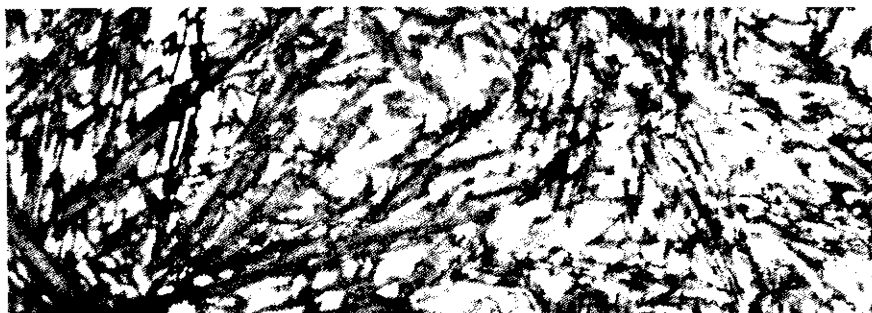



این‌شق‌دیگر تشکیل ($\alpha$ + کاربید)، شامل فازانتقالی مارتنزیت M است (شکل ۱۰-۱-۱۰). این فازچند شکل آهن، پایدار نیست زیرا درصورتی که فرصتی به‌آن داده‌شود مارتنزیت بـه‌سمت تشکیل ($\alpha + \bar{C}$) مـی‌رود. در نتیجـه در نمودار $Fe-Fe_3C$ (شکل ۹-۷-۱) مارتنزیت دیده نمی‌شود. ولی همان‌طور که خواهیم دید مارتنزیت فاز بسیار مهمی است.

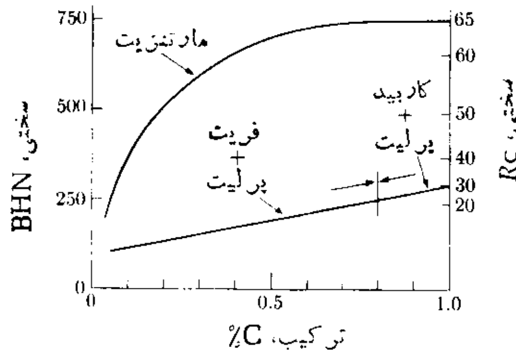
مارتنزیت در دماهای پایینتر از اوتکتویید تشکیل می‌شود (اما بالاتر از دمای اتاق)، زیرا ساختار fcc استنیت به‌اندازهٔ کافی نـاپایدار است و درنتیجه خـود به‌خود به‌طریق خاصی به‌ساختار مرکزدار تبدیل می‌شود. این‌عمل از برش حـاصل می‌شود و نفوذ در آن دخالتی ندارد. تمام اتمها، هماهنگ با یکدیگر تغییر مـکان می‌دهند و هیچ‌کدام از آنها بیش‌از کسر نانومتر ازهمسایه‌های قبلی خود دور نمی‌شوند. بدون نفوذ، تغییر بسیارسریع صورت‌می‌گیرد و تمام کربن موجود در محلول‌جامد باقی‌می‌مانند. ساختار مرکزدار حاصل به‌جای مکعبی، چهار وجهی (bct) است که بافریت کاملا فرق دارد.

چون ساختار مارتنزیت غیر مکعبی است وکربن در شبکه محبوس می‌شود، لغزش به‌آسانی انجام‌نمی‌شود و بنابراین‌مارتنزیت‌سخت، محکم وشکننده‌است. شکل ۱۰-۱-۱۱ سختی فولاد پرلیتی و مارتنزیتی را به‌صورت تابعی از مقدار کربن بـاهم مقایسه می‌کند. این سختی زیاد ازنظرمهندسی اهمیت بسیار دارد زیرا فولاد حاصل درمقابل تغییرشکل و سایش بسیار مقام است.

وجود مارتنزیت به‌عنوان فاز نیم‌پایداری که شامل محلول جامد bct حاوی‌کربن است نمودار تعادلی آهن کربن را تغییرنمی‌دهد (شکل ۹-۷-۱). هرگاه در دماهای کمتر



**شکل۱۰-۱-۱۰** مارتنزیت ($\times 1000$). دانه‌هـای مجزا به‌صورت بلورهایی صفحه‌مانندند و همان ترکیب دانه‌ها در استنیت اولیه را دارند.




**شکل ۱۰-۱-۱۱** سختی آلیاژهای تابکاری‌شدهٔ آهن-کربن ($\alpha$+ کاربید) و سختی مارتنزیت برحسب مقدار کربن. این اختلاف درسختی به‌دلیل آب دادن فولاد است.

از دمای اوتکتویید به مارتنزیت فرصت کافی داده شود، محلول فوق اشباع کربن درآهن به‌تدریج به‌فازهای پایدارتر یعنی «فریت وکاربید» تبدیل می‌شود (رابطهٔ ۱۰-۱-۷). در اصطلاح تجارتی این‌عمل را بازپخت می‌نامند



$$M \longrightarrow \alpha + \text{کاربید} \qquad (۱۰-۱-۸)$$

(مارتنزیت بازپخت شده) (مارتنزیت)

میکروساختارحاصل ($\alpha+\bar{C}$) مانندپرلیت لایه‌ای نیست بلکه شامل ذرات پراکندهٔ کاربید است (شکل ۱۰-۱-۱۲) زیرا درفولاد مارتنزیتی مکانهای متعددی برای جوانه‌زنی‌وجود دارد. این مارتنزیت بازپخت شده* گرچه کمی نرمتر از مارتنزیت اولیه است، ولی بسیار چقرمه‌تر از آن و بنابراین محصول مناسبتری است.

**مثال ۱۰-۱-۱** دونمونهٔ همانند از مفرغ تا $610°C$ و $700°C$ گرم شده‌اند. اندازدانهٔ اولی درمدت ۳۰ساعت دوبرابر شده و از $0.05\ mm$ به $0.1mm$ رسیده‌است. نمونهٔ دوم فقط ۳۰دقیقه در $700°C$ نگه داشته شده است. زمـان لازم برای نگه‌داشتن قطعه در $750°C$ را تخمین بزنید.

حل: هریك به‌انتقال جرم یکسانی نیاز دارد. ازآنجـا که رشد دانه یك‌فرایند نفوذ

---

* توجه داشته باشید که مارتنزیت بازپخت شده ساختار بلوری مارتنزیت را ندارد. برعکس دارای میکروساختار دوفازی فریت و کاربید است. این میکروساختار از تجزیهٔ مـارتنزیت ناشی می‌شود.



**شکل ۱۰-۱-۱۲** مارتنزیت بازپخت شده (فولاد اوتکتویید ۱۵۰۰۰ X ). این فولاد قبلا آب داده شده تا ساختار راست وجهی مرکزدار (bct) با سختی ۶۵ Rc به‌دست آید. سپس در ۴۲۵°C (۸۰۰°F) به‌مدت یك ساعت بازپخت شده است. مارتنزیت بازپخت شده میکروساختار دو فازیی دارد که حاوی ذرات کاربید (نقاط روشن) در زمینهٔ فریتی (نقاط تیره) است. مارتنزیت بازپخت شده ابتدا بسیار سخت و شکننده بود. با عملیات گرمایی بالا، مارتنزیت بازپخت شده اکنون ۴۴Rc سختی‌دارد ولی‌بسیارچقرمه‌تر است.

است از رابطهٔ آرنیوس استفاده می‌کنیم

$$\ln R=\ln R_{\circ}-\frac{E}{kT}=-\ln t \qquad (۱۰-۱-۲)$$

یا

$$\ln t=C+\frac{B}{T} \qquad (۱۰-۱-۱)$$

$$\ln ۳۰\ \mathrm{hr}=C+\frac{B}{۸۸۳\,\mathrm{K}}=۳٫۴۰$$

$$\ln ۰٫۵\ \mathrm{hr}=C+\frac{B}{۹۷۳\,\mathrm{K}}=-۰٫۷۰$$

باحل همزمان دو معادلهٔ خواهیم داشت

$$C=-۴۰٫۸۶ \quad \text{و} \quad B=۳۹٫۱۰۰\,\mathrm{K}$$

$$\ln t=-۴۰٫۸۶+\frac{۳۹۱۰۰\,\mathrm{K}}{۱۰۲۳\,\mathrm{K}}$$

$$t=۰٫۰۷\,\mathrm{hr} \quad (\text{یا } ۴^{+}\,\mathrm{min})$$

توضیح. اندازهٔ دانه در فاصلهٔ زمانی دوم دوبرابر نخواهد شد زیرا با افزایش اندازهٔ دانه سرعت رشد کاهش می‌یابد.

▲

**مثال ۱۰-۱-۲** آلیاژی از Al–Cu در $550°C$ دارای ۲درصد اتمی مس در محلول جامد $\kappa$ است. آن را آب داده و دوباره تا $100°C$ گرم می‌کنیم تا $\theta$ رسوب کند (شکل ۹-۵-۳). فاز $\theta$ $(CuAl_2)$ به‌صورت ذرات بسیار ریزی در تمام آلیاژ پراکنده می‌شود به‌طوری‌که فاصلهٔ متوسط ذرات از هم فقط ۵۰ر۰nm است. الف) در هرسانتی‌متر مکعب تقریباً چند ذره وجود دارد؟ ب) اگر با برون‌یابی منحنی شکل ۹-۵-۳ در $100°C$ مقدار مس باقیمانده در $\kappa$ را قابل‌اغماض فرض کنیم، درهر ذره $\theta$ چنداتم مس وجود دارد؟

حل: الف) فرض‌کنید در هر ۵۰ر۰nm یک‌ذره وجود داشته‌باشد

$$\text{تعداد ذرات} \sim \frac{1}{(5\times 10^{-9}\text{m})^3} = \sim 8\times 10^{24}/\text{m}^3 \quad (\text{یا} \sim 8\times 10^{15}/\text{mm}^3)$$

$$a_\kappa = \frac{4(\sim 0.143\,\text{nm})}{\sqrt{2}} = \sim 0.404\,\text{nm}$$

ب) اگر در هرسلول واحد ۴ اتم وجود داشته باشد و درصد اتمی مس ۲ باشد

$$\text{Cu/m}^3 = \frac{0.02(\text{سلول واحد/اتم } 4)}{(0.404\times 10^{-9}\text{m})^3}$$

$$= 1.2\times 10^{27}/\text{m}^3$$

$$\text{در هرذره Cu} = \frac{(1.2\times 10^{27}/\text{m}^3)}{(\sim 8\times 10^{24}/\text{m}^3)}$$

$$= \sim 150\,\text{Cu/در هرذره}$$

توضیح. این میکروساختار تقریباً همان است‌که در رسوب سختی بـا آن برخورد خواهیم کرد (بخش ۱۱-۳). ▲

**مثال ۱۰-۱-۳** ابعاد سلول واحد bct برای مارتنزیتی‌کـه حـاوی ۸ر۰ w/o کربن (۶ر۳ a/o کربن) است، عبارت است از $a = 0.2845\,\text{nm}$ و $c = 0.2945\,\text{nm}$. ثابت شبکهٔ استنیت درهمین دما و باهمین ترکیب برابر ۳۶۰۵ر۰nm است. تغییر حجم درهنگام تبدیل $\gamma$ به‌مارتنزیت چقدر خواهد بود؟

حل: مبنا : ۴ اتم Fe، یا ۲ سلول واحد مارتنزیت و ۱ سلول واحد $\gamma$

$$\frac{\Delta V}{V_\gamma} = \frac{2(0.2845\,\text{nm})^2(0.2945\,\text{nm}) - (0.3605\,\text{nm})^3}{(0.3605\,\text{nm})^3}$$

$$= +0.018 \quad (\text{یا } 1.8\,\text{v/o})$$

توضیح. این تغییرحجم‌موجب تنشهای باقیمانده‌ای در فولاد آب داده شده،می‌شود. مثلا ابتدا سطح چرخ‌دنده‌ای فولادی به‌مارتنزیت تبدیل‌می‌شود (درحالی‌که مرکز آن هنوز استنیت تغییرشکل‌پذیر و گرم است). اندکی بعد مرکز آن به مارتنزیت تبدیل می‌شود که با انبساط حجمی همراه است. این‌امر موجب می‌شود که سطح تحت‌تنش قرار گیرد و در مارتنزیت کشش ایجاد شود (و استنیت تبدیل شده فشرده شود).

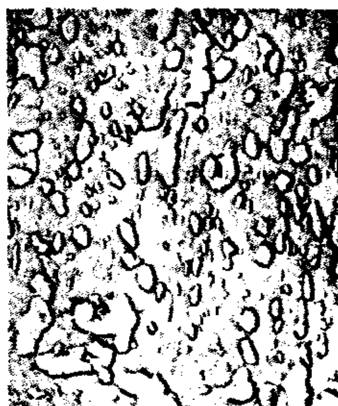
این تبدیل را با بازپخت شیشه مقایسه کنید (شکلهای ۸-۷-۴ و ۸-۷-۵). ▲

## ۱۰-۲ میکروساختارهای چندفاز

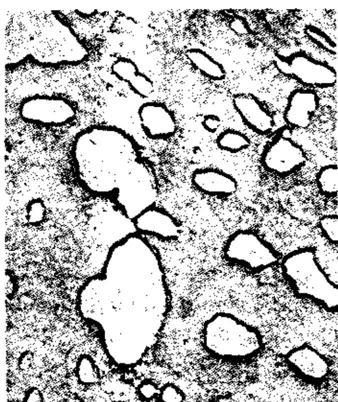
در شکل ۶-۱-۴ دیدیم کـه آلیاژ تك‌فاز مـی‌تواند دارای چندین متغیر هندسی باشد. متغیرهای میکروساختار عبارت بودند از اندازه، شکل، و جهتگیری.

میکروساختار آلیاژهای چندفاز نیز به‌همین صورت مـی‌تواند با اندازه، شکل، و جهتگیری فـازهای مجزا، تغییرکند. علاوه بـراین برای مقدار هرفاز با گستره‌ای روبرو خواهیم بود. بالاخره انواع مختلفی از توزیع فازها را خواهیم دید.

**اندازهٔ فاز.** مثالی در مورد اختلاف اندازه در شکـل ۱۰-۲-۱ دیده مـی‌شود. این دو میکروساختار ازیـك فولادند؛ بنابراین ترکیب مشابهی دارند (Fe ۲ر۹۹٪-C ۸ر۰٪). هردو تحت عملیات گرمایی قرارگرفته و استنیت تشکیل داده‌اند (استنیتی شده‌اند) و سپس آب‌داده شده و مارتنزیت تشکیل داده‌اند. این‌عملیات باگرم‌کردن آن تا تشکیل مارتنزیت



۵۹۵°C (۱۱۰۰°F)، ۱ ساعت، ۳۳Rc
(الف)



۶۷۵°C (۱۲۵۰°F)، ۱۲ ساعت، ۲۰$R_C$
(ب)

**شکل ۱۰-۲-۱** تصاویری از مـارتنزیت بازپخت شده زیر میکروسکوپ الکترونـی (۱۱۰۰۰ ×). هردو فولاد اوتکتوییدندکـه قبلا آب داده شده‌انـد و به‌بیشینهٔ سختی (۶۵ Rc) رسیده‌اند.

بازپخت شده که حاوی فریت وکاربید است (رابطهٔ ۱۰ـ۱ـ۸) ادامه یافته است. از آنجا کـه ترکیب دونمونه مشابه است، مقادیر یکسانی فریت و کاربید $(\alpha+\bar{C})$ دارند. این‌دو در اندازهٔ ذرات کاربید باهم تفاوت دارند. فولادی که کاربید ریزتری دارد فقط به‌مدت یك‌ساعت در $595^{\circ}C$ $(1100^{\circ}F)$ ودیگری به‌مدت دوازده‌ساعت در $675^{\circ}C$ $(1250^{\circ}F)$ بازپخت شده است. در مورد دوم زمان‌کافی برای تجمع‌کاربیدها و تشکیل ذرات بزرگتر (ولی کمتر) وجود داشته است.

توجه‌داشته باشیدکه دوفولاد شکل ۱۰ـ۲ـ۱ سختی‌متفاوتی‌دارند. همچنین استحکام آنها با یکدیگر فرق دارد. ذرات سخت کاربید، تغییرشکل پلاستیکی زمینهٔ فریتی نرم و انعطاف‌پذیر را محدودمی‌کند. مقدار قید مستقیماً به‌تماس بین دوفاز یعنی مرزبین فازهای فریت و کـاربید در واحـد حجم، بستگی دارد. بنابراین طبیعی است‌کـه کاربید ریزتر، میکروساختار سخت‌تری ایجاد می‌کند (مثال ۱۰ـ۲ـ۱).

**مقدار فاز.** مجموعهٔ فولادهایی که درشکل ۹ـ۸ـ۲ دیده می‌شوند به‌ترتیب کسر بیشتری پرلیت، و بنابراین کاربید، دارند. از آنجا که چگالی پرلیت و کاربید بسیار نزدیك به‌هم است (به‌ترتیب $7.88\,g/cm^3$ و $7.6\,g/cm^3$)، کسرحجمی‌دوفاز در فولادبسیارنزدیك به‌کسر وزنی‌آنهاست. این‌امر درتمام میکروساختارها صحت ندارد. مثلا لحیم Pb/Sn حاوی دوفاز است کـه چگالیهای بسیار متفاوتی دارند. بنابراین، کسر حجمی $\alpha$ و $\beta$ در شکل ۹ـ۱ـ۳ باید بـار دیگر از روی کسر وزنی محاسبه شود (مثال ۱۰ـ۲ـ۲). علاوه براین‌می‌توانیم قاعدهٔ مخلوطی برای‌چگالی، $\rho_m$، مخلوط فازها براساس کسرحجمی‌آنها $f$ و چگالی هرفاز بنویسیم

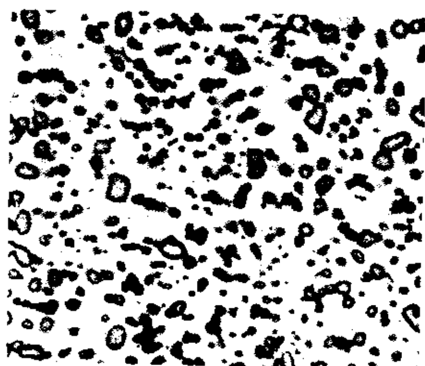
$$\rho_m = f_1\rho_1 + f_2\rho_2 + \cdots \qquad (10-2-1)$$

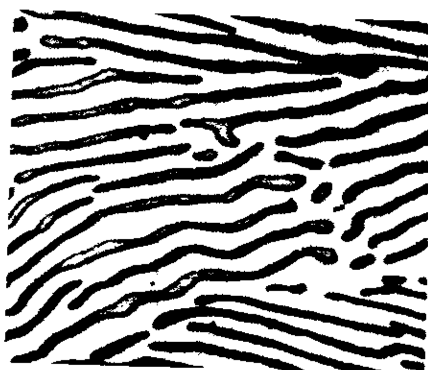
از این رابطهٔ خطی برای محاسبهٔ چگالی نیزمی‌توان استفاده کرد به‌شرط آنکه کسرحجمی به‌کاربرده شود، زیرا جرمها را می‌توان براساس حجم به‌سادگی باهم جمع‌کرد.*

**شکل فاز و توزیع آن.** دومثال‌رایج ولی مختلف دربارهٔ شکل فاز و توزیع آن، می‌توان درمورد فولادهایی با ترکیب اوتکتوئید (تقـریباً $Fe$ ۹۹٫۲ـ$0.8C$) ذکر کـرد. طبق شکل ۱۰ـ۲ـ۲ (الف)، پرلیت مخلوطی لایه‌ای ازفریت به‌علاوهٔ کاربید است. این‌فازفقط از تجزیهٔ استنیتی‌کـه مقدار کربن آنها برابر مقدارکربن نقطهٔ اوتکتوئید بـاشد، تشکیل می‌شود. دوفازجدید $(\alpha+\bar{C})$ در مرزدانه‌های‌استنیت جوانه‌می‌زنند و همراه‌هم به‌صورت دانه رشد می‌کنند (شکل ۱۰ـ۱ـ۹). کربن جدا می‌شود، فریت $(\sim 0.02\%C)$ به‌جـا

---

* رابطهٔ (۱۰ـ۲ـ۱) را درمـورد خـواصی مثل مقاومت ویژه و استحکام نمی‌توان به‌کاربرد، زیـرا ضرایب هندسی مثل مسیر رسانش، و سطح بین فازها، کـه تنها به‌کسر حجمی مربوط نمی‌شوند، نیز درآنها اثر دارند.


(ب)


(الف)

**شکل ۱۰-۲-۲** میکروساختار فولادهای اوتکتویید (۰٫۸۰% C). الف) پرلیت (X ۲۵۰۰) که از تبدیل استنیتی (γ) که ترکیب اوتکتویید دارد، تشکیل می‌شود؛ ب) ساختار کروی (X ۱۰۰۰) که از بازپخت آن در ۷۰۰°C (۱۳۰۰°F) تشکیل شده است.

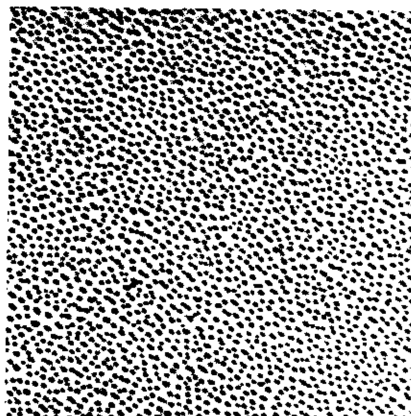
می‌ماند و کربن در کاربید (~۶٫۷% C) جمع می‌شود.

درشکل ۱۰-۲-۲(ب) ساختاری کروی داریم. کاربید درساختار کروی (همان‌طور که از اسم آن پیداست) به‌صورت ذرات کروی شکل پراکنده‌ای در زمینهٔ فریت است. ساختار کروی را می‌توان به‌دو روش تولیدکرد. روش اول بازپخت بیش‌از حد مارتنزیت است؛ به‌طوری‌که‌عملیات آغازشده درشکل ۱۰-۲-۱ تاایجاد کاربید کروی نسبتاً درشتی ادامه یابد. و بین کاربیدها در فواصل وسیعی‌فریت قرارگیرد. روش دوم گرم کردن پرلیت به‌مدت زیاد است (۲۴-۱۸ ساعت در ۷۰۰°C) به‌طوری‌که لایه‌های کاربید به‌صورت کروی درآیند. نیروی محرکهٔ این تغییرشکل و تبدیل آن به‌کره، کاهش مقدار سطح مرزدانه‌هاست.

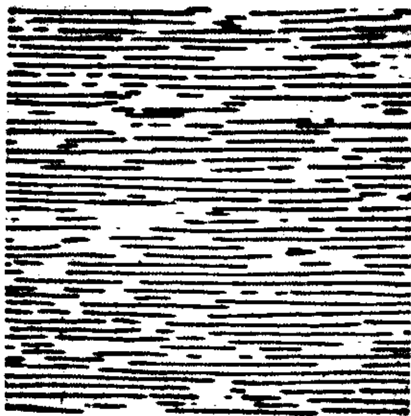
طرحوارهٔ مقایسهٔ توزیع فازها نیز درشکل۱۰-۱-۸ دیده می‌شود. با رسوب در دمای بالا (یا با آهسته سردکردن)، فاز رسوب‌کننده جوانه می‌زند و در مرزدانه‌های محلول جامد اصلی‌رشد می‌کند [شکل ۱۰-۱-۸(ب)]. بنابراین شبکهٔ مرزدانه فازجدیدی را تشکیل‌می‌دهد. اگر این فاز ترد باشد، خواهیم‌دیدکه کل ماده ترد است، زیرا ترکهای منتشر شده راههایی برای شکست با انرژی‌کم به‌وجود آورده‌اند. درعوض فوق سرمایش زیادبراثر افت سریع دما، موجب‌توزیع ریز ذرات رسوب‌کننده می‌شود [شکل ۱۰-۱-۸ (ج)]. باتوزیع ذرات سخت در داخل زمینهٔ انعطاف‌پذیر، موقعیت مناسبی به‌دست می‌آید که در آن ذرات سخت موجب قیدپلاستیکی می‌شوند و بنابراین زمینهٔ میکروساختار را مستحکم می‌کنند. در عین‌حال زمینهٔ نرم، چقرمه است. ازآنجاکه ترک منتشر شونده باید

از این فاز چقرمهٔ زمینه عبور کند، انرژی لازم است بنابراین چقرمگی کل ماده و همچنین استحکام آن بیشتر می‌شود.

□ به‌عنوان مثال دیگری ازشکل فاز و توزیع آن شکل ۱۰-۲-۳ را درنظر می‌گیریم، که تصاویرطولی و عرضی‌میکروساختار اوتکتیك آلومینیم و $Al_3Ni$ را نشان می‌دهد. فاز روشنتر زمینهٔپیوسته‌ای از آلومینیم‌است. فازتیره‌تر الیاف $Al_3Ni$، ترکیب سخت وصلب بین‌فلزی آلومینیم و نیکل، است. شکل هندسی این میکروساختار باپلاستیك تقویت شده با الیاف شیشه‌ای، قابل مقایسه است. ولی این ساختار با روش کاملا متفاوتی به‌وجود آمده است. دراین پلاستیکها، می‌توان الیاف را باپیچاندن رشته‌ها دور میله‌ها یا با دسته‌دسته‌کردن آنها جهتدار کرد. سپس رزینها را به داخل این الیاف نفوذ می‌دهند تا پس‌از پلی‌مری‌شدن بـه‌صورت ماده‌ای بـا زمینهٔ پیونددهنده درآیند. میکروساختار شکل ۱۰-۲-۳ دراثر انجماد جهتدار آلیاژ مایعی باترکیب اوتکتیك، تشکیل‌شده است (شکل ۱۰-۲-۴). ازآنجاکه اوتکتیك‌درمحل تقاطع دومنحنی‌حلالیت قراردارد، مایع اوتکتیك هنگام انجماد، به‌طور همزمان دو جامد وجود می‌آورد. اگر گرما فقط از یك‌جهت خارج شود، انجمادجهتداراست و دوفاز به‌موازات هم‌رشد می‌کنند. ازآنجاکه فاز $\beta(Al_3Ni)$ فاز کمتر است، شکل‌هندسی الیاف‌مانندی دارد. این‌آلیاژها موردتوجه خاص قراردارند. زیرا روشی برای تولید فلزاتی به‌دست می‌دهندکه باالیاف صلب تقویت شده‌اند.

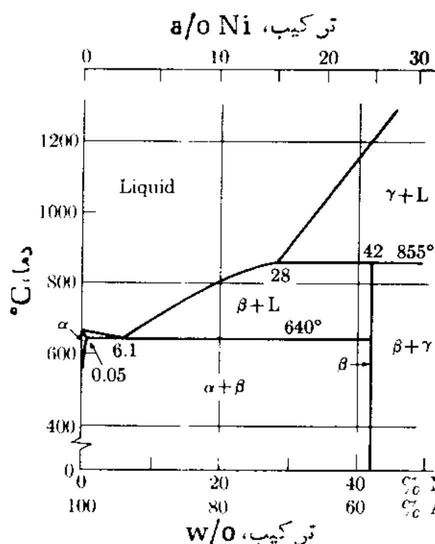


(الف)



(ب)

**شکل ۱۰-۲-۳** جهتگیری فاز. در هر میکروساختاری، فازها ارتباط ویژه‌ای ازنظر شکل بلوری دارند. الف) تصویر عرضی؛ و ب) تصویر طـولی میکروساختار اوتکتیك $Al-Al_3N$ (×۴۰۰).




**شکل ۱۰-۲-۴** نمودار Al–Ni. میکروساختار شکل ۱۰–۲–۳ در اثر انجماد جهتدار مـایع او تکتیک (۶٫۱% Ni) تشکیل شده است. دوفاز α و β به‌طورهمزمان به‌وجود می‌آیند، درحالی که β فقط ۷% حجم(۱۴ w/o) را تشکیل می‌دهد.

**مثال ۱۰-۲-۱** سطح مرزهای بین‌فازی ($mm^۲/mm^۳$) دومارتنزیت بازپخت شدهٔشکل ۱۰–۲–۱ (با بزرگنمایی ۱۱۰۰۰) را باهم مقایسه‌کنید.

حل: بااستفاده از رابطهٔ (۴–۴–۱) و پیرامون شکل میکروسکوپی، درقسمت (ب) داریم

$$P_L = \frac{\sim ۲۰}{۲۱۵\ mm/۱۱۰۰۰} = \sim ۱۰^۳/mm$$

$$S_V = \sim ۲۰۰۰\ mm^۲/mm^۳$$

در قسمت (الف)

$$S_V = \frac{۲(\sim ۵۰)}{۲۱۵\ mm/۱۱۰۰۰}$$

$$= \sim ۵۰۰۰ mm^۲/mm^۳$$

توضیح. مارتنزیت بازپخت‌شده‌ای‌که سطح مرز بین فازهای آن بیشتراست سخت‌تر است. برای مقایسهٔ مستقیم مثلا سختی، جنبه‌های دیگر میکروساختار مثل شکل دانه و مقدار فازها باید یکسان باشد. ▲

**مثال ۱۰-۲-۲** چگالی لحیم (اوتکتیک) را که در دمای ۲۰ °C به‌حـالت تعادل رسیده است حساب کنید.

حل: از آنجا که β و α تقریباً به‌ترتیب Sn و Pb خالص‌اند؛ $\rho_\beta = ۷٫۳ Mg/m^۳$

و $\rho_\alpha = \sim ۱۱٫۳ \text{ Mg/m}^۳$ (یا $۱۱٫۳ \text{ Mg/mm}^۳$). مبنا: $۱۰۰ \text{ Mg} = ۶۱٫۹ \text{mg} \beta$
و $۳۸٫۱ \text{ mg } \alpha$

$$\beta : \frac{۶۱٫۹ \text{ mg}}{۷٫۳ \text{mg/mm}^۳} = ۸٫۴۸ \text{ mm}^۳ \quad f_\beta = ۰٫۷۱۵$$

$$\alpha : \frac{۳۸٫۱ \text{ mg}}{۱۱٫۳ \text{ mg/mm}^۳} = ۳٫۳۷ \text{ mm}^۳ \quad f_\alpha = ۰٫۲۸۵$$

$$\overline{۱۱٫۸۵ \text{ mm}^۳} \quad \text{کل}$$

$$\rho = ۰٫۷۱۵(۷٫۳ \text{ mg/mm}^۳) + ۰٫۲۸۵(۱۱٫۳ \text{ mg/mm}^۳)$$
$$= ۸٫۴۴ \text{ mg/mm}^۳ \ (\text{یا } ۸٫۴۴ \text{Mg/m}^۳)$$

در شق دیگر، $\rho = ۱۰۰ \text{mg}/۱۱٫۸۵ \text{ mm}^۳ = ۸٫۴۴ \text{ mg/mm}^۳$. ▲

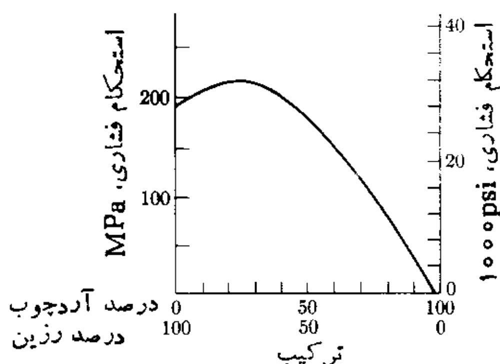
## ۱۰-۳ میکروساختارها: خواص مکانیکی

خواصی مانند سختی و استحکام را نمی‌توان باقواعد سادهٔ مخلوط خواص فازهای شرکت کننده برآورد کرد. مثلا فولادهای شکل ۱۰-۲-۱ دارای استحکام کششی بیشتر از ۷۰۰ MPa هستند. ولی استحکام فاز زمینه (فریت) کمتر از یک‌سوم این مقدار است. از آنجاکه فریت فازی پیوسته است و بنابراین تمام بار باید توسط آن تحمل شود می‌توان نتیجه گرفت که «زنجیر از ضعیفترین اتصال‌خود قویتراست». بااینکه برای این‌حالت منطق ریاضی وجود دارد؛ ولی توضیح کیفی مطلب به‌سادگی چنین است که ذرات صلب کاربید جلوی لغزش را می‌گیرند و مانع از برش زمینهٔ ضعیفتر می‌شود.* این را قید پلاستیکی می‌نامیم.

**آثار مقدار فازها.** گرچه شرح دقیقی از خواص برهم‌کنشی را ارائه نکردیم اما ازاین خواص استفاده می‌کنیم، زیرا با افزودن پرکننده‌ها می‌توان مواد را استحکام بخشید. مثلا اضافه‌کردن (۱) کربن به‌لاستیک، (۲) ماسه به‌خاک‌رس، (۳) ماسه به‌قیر یا آسفالت، (۴) آردچوب به‌پلاستیک یا (۵) رسوبهای بین فلزی به‌فلزات نرم، مقاومت را در برابر تغییر

---

* این را می‌توان با استفاده از مقداری لحیم ($S_t \simeq ۳۵\text{MPa}$) برای اتصال دو قطعهٔ فولاد به‌هم نشان‌داد. اگر اتصال لحیم‌شده نازک باشد، این‌اتصال می‌تواند تنش بیش از ۱۷۰MPa را تحمل کند! اگر چه لحیم ضعیف است ولی تغییرشکل نمی‌دهد زیرا توسط فولاد قویتر متصل به‌آن نگه‌داشته شده‌است. اگر اتصال نازک و نازکتر شود، احتمال کمتری برای تغییرشکل پلاستیکی درلحیم ضعیف وجود خواهد داشت، بنابراین اتصال حتی قویتر خواهد شد.




**شکل ۱۰-۳-۱** استحکام مخلوطها (آردچوب به عنوان پرکننده در رزین فنل-فرم آلدئید)، مخلوط آردچوب و رزین از تك‌تك آنها استحکام بیشتری دارد. آرد چوب جلوی لغزش رزین را می‌گیرد، رزین ذرات آردچوب را بههم پیوند می‌دهد.

شکل زیاد می‌کند. اثر افزودن پرکننده براستحکام (مثال چهارم) را نمودار شکل ۱۰-۳-۱ نشان می‌دهد. گرچه رزین فنل-فرم آلدئید به‌تنهایی استحکام قابل‌ملاحظه‌ای دارد، ولی تحت تنش ممکن است دچار شکست برشی شود، و افزودن فاز دیگری به‌آن مقاومت در برابر تغییرشکل را افزایش می‌دهد. در انتهای دیگر گسترهٔ ترکیب استحکام آردچوب (خاك ارهٔ نرم) به‌تنهایی صفراست زیرا برای‌نگه‌داشتن تك‌تك ذرات سلولز به‌صورت یك جرم همدوس، نیرویی وجود ندارد، افزودن رزین فنل-فرم آلدئید به‌این ذرات ریز آنها را به هم می‌چسباند. بیشینهٔ استحکام از آمیختن این ترکیبات به‌دست می‌آید زیرا مخلوط کردن فازها باعث استحکام می‌شود.

ساختار بزرگراهها مثال‌دیگری از کاربردمخلوط‌فازهاست. آشکار است که زیرسازی جاده نمی‌تواند به‌تنهایی از خاك‌رس یا از سنگ‌ریزه یا ماسه باشد، اما مخلوط مناسبی از خاك‌رس وسنگ‌ریزه، زیرسازی محکم وقابل‌استفاده‌ای به‌وجودمی‌آورد (شکل ۱۰-۳-۲).

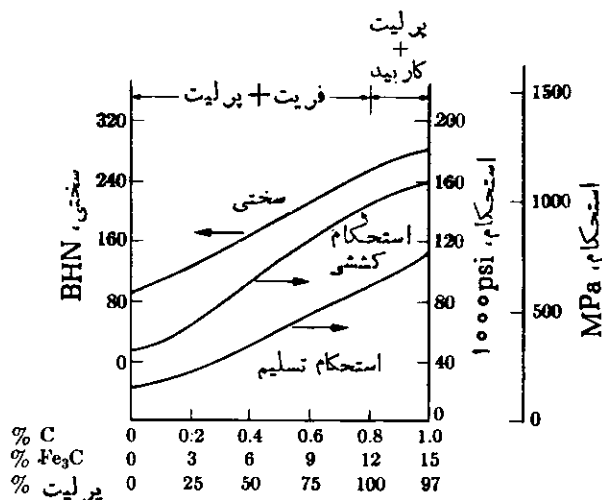


**شکل ۱۰-۳-۲** زیرسازی محکم. مخلوط خاك‌رس و سنگ‌ریزه پادوامتر از هرکدام از آنهاست.

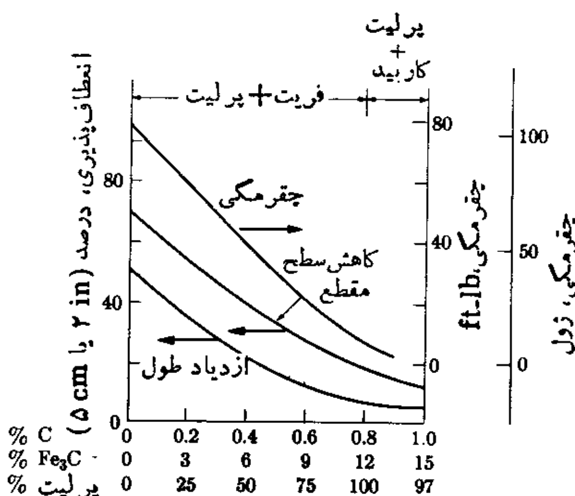
به‌این ترتیب کــه سنگ‌ریزه‌هــای سخت، خــاک‌رس را محکم مــی‌کنند و خــاک‌رس هم سنگ‌ریزه‌ها را به‌هم می‌چسباند و آنها را به‌صورت جرم همدوسی درمی‌آورد که دربرابر بار متمرکز مقاومت می‌کند.

پرلیت مثال‌کمی خــوبی درمورد ارتباط میکروساختار و خــواص مکانیکی است. شکلهای ۱۰ـ۳ـ۳ و ۱۰ـ۳ـ۴ سختی، استحکام، انعطاف‌پذیری و چقرمگی را برحسب مقدار کربن نشان مــی‌دهند. شکل دوم را مــی‌توان برحسب درصد کــاربید، یــا برحسب میکروساختار یعنی درصد پرلیت نشان داد. بنابراین فــولاد ۱۰۴۰ شکل ۱۰ـ۳ـ۵ کــه حاوی ۰٫۴۰٪ کربن است، ۵۰٪ پرلیت دارد و بقیهٔ آن فریت پرواوتکتویید است. فولاد ۱۰۸۰ حاوی ۱۰۰٪ پرلیت است [شکل ۱۰ـ۳ـ۵ (ب)].

فولادهای شکل ۱۰ـ۳ـ۳ استحکام بیشتری دارند زیرا لایه‌هــای کاربید موجب قید پلاستیکی می‌شوند و جلوی تغییرشکل فریت انعطاف‌پذیر را می‌گیرند. البته مقدار بیشتر کاربید سطح مرزدانه‌هــای بین دوفاز را زیاد مــی‌کند و بنابراین شیب مثبتی به‌منحنیهای شکل ۱۰ـ۳ـ۳ مــی‌دهد. به‌همین‌دلیل عکس این‌وضعیت برای منحنیهای شکل ۱۰ـ۳ـ۴ به‌وجود می‌آید، به‌ویژه بــا وجود مقدار بیشتر کاربید انعطاف‌ناپذیر تغییرشکل پلاستیکی کمتری قبل‌از شکست ممکن می‌شود. این امر نه‌تنها انعطاف‌پذیری را کاهش می‌دهد، بلکه




**شکل ۱۰ـ۳ـ۳** سختی و استحکام فولادهای سادهٔ تابکاری شده برحسب مقدار کربن. میکروساختار این فولادها مطابق باشکل ۱۰ـ۳ـ۵ است. سختی را درطرف چپ و استحکام را در طرف راست بخوانید.



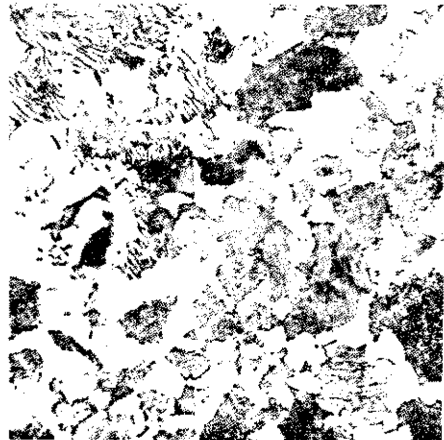

**شکل ۱۰-۳-۴** چقرمگی و انعطاف‌پذیری فولادهای ساده تا بکاری‌شده برحسب مقدار کربن. (به‌شکل ۱۰-۳-۵ رجوع کنید.) فولادهایی که‌فریت پرواوتکتویید بیشتری‌دارند چقرمه‌تر و انعطاف‌پذیرترند. انعطاف‌پذیری را درطرف چپ وچقرمگی را درطرف راست بخوانید.

**چقرمگی را نیز کم می‌کند.***

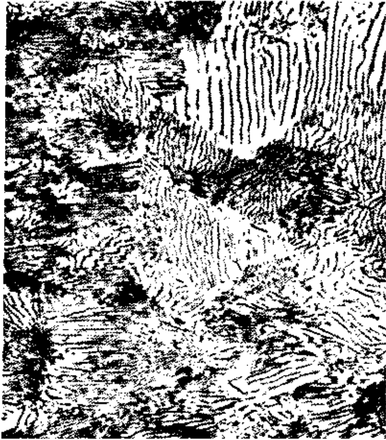
**می‌توانیم‌تردی (کمبود چقرمگی) فولادهارا برحسب افزایش مقدار کربن، براساس میکروساختار نیزشرح دهیم. باافزایش‌پرلیت [شکل ۱۰-۳-۵(ب)] مسیرترد پیوسته‌ای درطول لایه‌های کاربید به‌وجودمی‌آیدکه ترک می‌تواند به‌آسانی درآن مسیر پیشروی کند.**

**آثار اندازهٔ فاز.** قبلا شرح دادیم که ماسه خیلی‌نرم نسبت به سنگ‌ریزه، بادرصد حجمی برابر، آسفالت‌را مستحکمترمی‌کند. به‌همین‌ترتیب ذرات‌ریزترکاربید بیشتراز کاربیدهای درشت‌تر، فریت‌انعطاف‌پذیر را استحکام‌می‌بخشند (شکل ۱۰-۲-۱). همین نتایج درشکل ۱۰-۳-۶ برای فولادهای حاوی پرلیت درشت و ریز دیده می‌شود. منظور ما فولادهایی است که لایه‌های ضخیمتر یا نازکترفریت و کاربید دارند. همان‌طورکه درشرح واکنشهای

* چقرمگی به‌حاصل‌ضرب تنش وکرنش بستگی دارد، و بنابراین به‌حاصل ضرب استحکام در انعطاف‌پذیری نیز مربوط می‌شود. از شکلهای ۱۰-۳-۳ و ۱۰-۳-۴ می‌توان دریافت کـه کاهش انعطاف‌پذیری نسبتاً بیشتراز افزایش استحکام است. بنابراین با افزایش کربن کاهشی در چقرمگی به‌وجود می‌آید.



(الف)

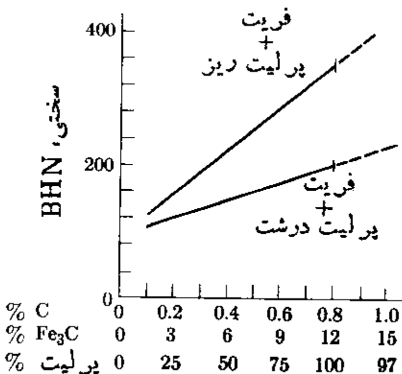


(ب)

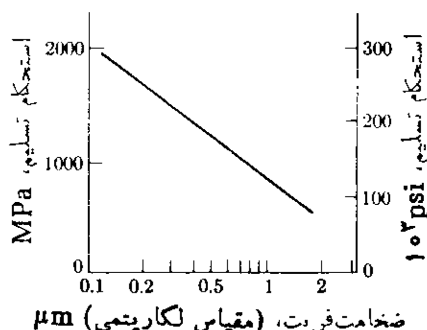
**شکل ۱۰-۳-۵** میکروساختار فولادهـای پرلیتی (۵۰۰ ×). الف) ۴۰ر۰٪ کربن؛ ب) ۸۰ر۰٪ کربن. در فولاد ۴۰ر۰٪ کربن قبل‌ازآنکه واکنش اوتکتوییدی، درپرلیت (خاکستری) فریت لایه‌ای به‌وجود آورد، سطوح وسیعتر فریت (سفید) تشکیل می‌شود. فولاد ۸۰ر۰٪کربن فقط حاوی فریت اوتکتویید است. (شکلهای ۹-۷-۳ و ۹-۸-۱ را مقایسه‌کنید.)

اوتکتویید در بخش ۱۰-۱ گفتیم سردکردن با سرعت زیاد (یا تجزیهٔ استنیت در دمـای پایینتر) موجب به‌وجودآمدن لایه‌هـای بیشتر و نـازکتری می‌شود زیرا نفوذ به‌فواصـل کوتاهتری محدود شده است.

درشکل ۱۰-۳-۷ رابطهٔ کمّیتری بین ابعاد لایه‌هـا و استحکام تسلیم دیده می‌شود. در لایه‌هـای نازکتر پرلیت ریز، سطح مرزدانه درواحـد حجم بیشتر است. بنابراین قید پلاستیکی آن از فریت قابل تغییرشکل معمولی، بیشتر است. شکل ۱۰-۳-۸ سختی فولاد




**شکل ۱۰-۳-۶** اثـر ابعاد میکروساختار روی سختی فولاد. پرلیت ریزتر و سخت‌تر با سردکردن سریعتر حاصل شده است.



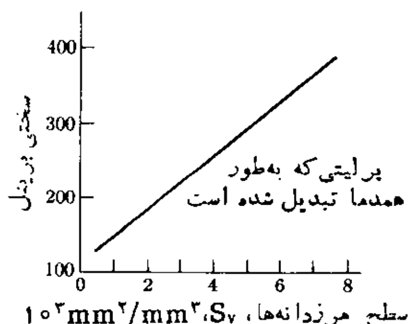

**شکل ۱۰-۳-۷** استحکام برحسب میکروساختار (ضخامت فریت درون پرلیت). لایه‌های نازکتر، با افزایش لایه‌ها، قید پلاستیکی بیشتری ایجاد می‌کنند. بنابراین استحکام تسلیم افزایش می‌یابد.

پرلیتی ۱۰۸۰ را به‌مقدار سطح مرزدانهٔ فریت/کاربید در واحد حجم، مربوط می‌کنند.

آثار کمی مشابهی درمورد اندازه درشکل ۱۰-۳-۹ دیده می‌شود که در آن زمان و دما باهم درنظر گرفته شده‌اند. سختی مارتنزیت اولیه ($۶۵ R_C$) در مارتنزیت بازپخت شده باقی نمی‌ماند. سرعت به‌هم آمیختگی که در شکلهای ۱۰-۲-۱ (الف) و (ب) دیده می‌شود، در دماهای بالا زیاد است. اگر مارتنزیت در ۶۰۰°C بازپخت شود، درشت‌شدن کاربید درعرض چندثانیه سختی را تاکمتراز $۵۰ R_C$ پایین مسی‌آورد. در ۴۰۰°C همان عمل نرم‌شدن تقریباً یک‌ساعت‌طول می‌کشد. در ۲۰۰°C سختی‌درساعت اول فقط تا $۶۰ R_C$ افت می‌کند.*

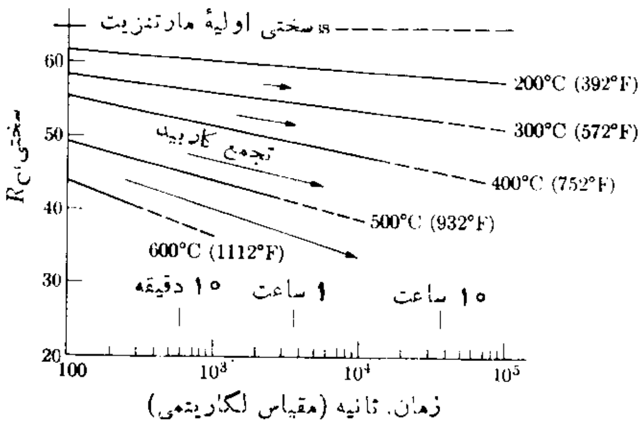
روابط شکل ۱۰-۳-۹ لگاریتمی است زیرا بازپخت شامل حرکت اتمها می‌شود. فعالسازی لازم از نظرگرمایی کنترل می‌شود (مثال۱۰-۳-۲ را ببینید).

**آثار شکل فاز و توزیع آن.** درشکل۱۰-۲-۲، درشکل‌هندسی‌فازکاربید دومیکروساختار تضاد محسوسی دیدیم. هردو چگالی یکسانی دارند زیرا کسر حجمی فریت و کاربید درآنها یکسان‌است. ولی این‌دو، خواص‌مکانیکی کاملا متفاوتی‌دارند (شکل ۱۰-۳-۱۰).



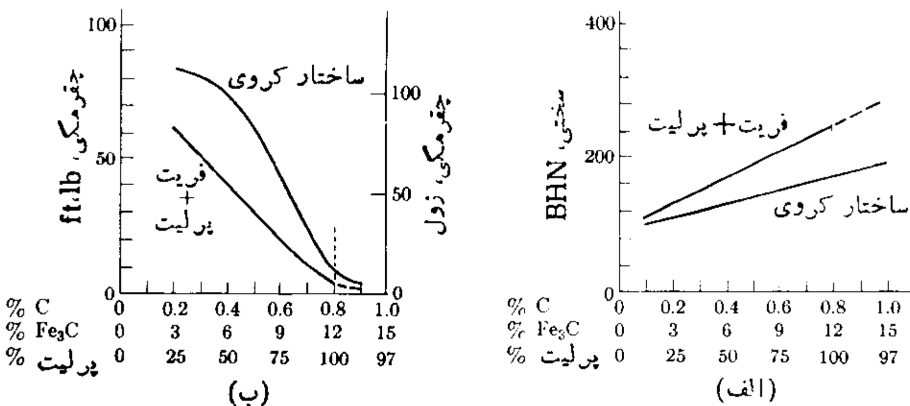

**شکل ۱۰-۳-۸** استحکام برحسب میکروساختار (فولادپرلیتی ۱۰۸۰). فولاد سخت‌تر است زیرا سطح مرزدانه‌های فریت-کاربید بیشتر است (لایه‌های نازکتر).

* در ۲۰°C بازپخت تقریباً بینهایت آهسته صورت‌می‌گیرد. باستانشناسان مصنوعاتی از ابزار قدیمی به‌دست آورده‌اند که پس‌از قرنها هنوز ساختار مارتنزیتی دارند.




**شکل ۱۰-۳-۹** سختی مارتنزیت بازپخت شده (فولاد ۱۰۸۰، آب داده شده تاسختی $۶۵ R_C$) همین که ذرات کاربید تجمع یابند، نواحی فریت بین آنها وسیعتر شده و عمل نرم شدن انجام می‌شود.

کاربیدهای لایه‌ای پرلیت، قیدپلاستیکی بیشتری ایجادمی‌کنند و بیشتر از آنکه کاربیدهای کروی در ساختار کروی جلوی تغییرشکل را می‌گیرند، این لایه‌ها مانع از تغییرشکل می‌شوند. این تضاد که درشکل ۱۰-۳-۱۰ (الف) به‌صورت اختلاف سختی دیده می‌شود در درجهٔ اول تابع سطح مرزبین فازهاست زیرا فریت مجاور است که در مقابل لغزش مقاومت می‌کند. از آنجاکه در دو میکروساختار، کسر حجمی کاربید یکسان است، میکروساختار غیرکروی سطح مرزدانهٔ بیشتری در واحد حجم دارد.




**شکل ۱۰-۳-۱۰** سختی و چقرمگی برحسب، شکل کاربید (فولادهای ساده پرلیتی تابکاری‌شده). کاربیدها درپرلیت لایه‌ای و درساختار کروی شبیه به کره‌اند.

ساختار کروی از پرلیت نرمتر وضعیفتر، ولی چقرمه‌تراست [شکل ۱۰-۳-۱۰(ب)].
این‌مثال دیگری است ازآنچه که قبلا شرح داده شد. در مقایسه با پرلیت، ترک در حال پیشروی در ساختار کروی، باید از میان زمینهٔ چقرمهٔ فریت بیشتری عبور کند. بنابراین انرژی بیشتری جذب می‌شود.

**مثال ۱۰-۳-۱** فولاد اوتکتوئید (۱۰۸۰) حاوی فریت ($\rho = ۷٫۸۸\ g/cm^۳$) وکاربید ($\rho = ۷٫۶\ g/cm^۳$) است. الف) چگالی فولاد چقدر است؟ ب) نسبت تقریبی ضخامت لایه‌های فریت $t_\alpha$ به‌ضخامت لایه‌های کاربید $t_{\bar{C}}$ چقدر است؟

حل: مبنا: $۱۰۰\ g$ فولاد $= ۰٫۸\ g$ کربن $= ۱۲\ g$ $Fe_۳C$ $+ ۸۸\ g\ \alpha$

$$\frac{۸۸\ g\alpha}{۷٫۸۸\ g/cm^۳} = ۱۱٫۱۷ cm^۳\ \alpha$$

$$\frac{۱۲\ g\bar{C}}{۷٫۶\ g/cm^۳} = ۱٫۵۸\ cm^۳\ \bar{C}$$

$$\overline{۱۲٫۷۵\ cm^۳}$$

الف)

$$\rho = \frac{۱۰۰\ g}{۱۲٫۷۵\ cm^۳} = ۷٫۸۴\ g/cm^۳\ (\text{یا}\ ۷٫۸۴\ Mg/m^۳)$$

(ب) ازآنجاکه ابعاد بلند لایه‌های $\alpha$ و $\bar{C}$ اساساً یکسان‌اند

$$\frac{t_\alpha}{t_{\bar{C}}} = \frac{V_\alpha}{V_{\bar{C}}} = ۱۱٫۱۷/۱٫۵۸ = \sim۷$$ ▲

**مثال ۱۰-۳-۲** داده‌های شکل ۱۰-۳-۹ نشان‌می‌دهدکه $۱۰^۴$ ثانیه طول می‌کشد تاسختی مارتنزیتی که‌در دمای $۳۶۰°C$ بازپخت می‌شود از $۶۵R_C$ به $۵۰R_C$ برسد و در $۴۹۰°C$ این‌زمان به ۱۰۰ ثانیه می‌رسد. بـا درنظرگرفتن رابطهٔ آرنیوس (رابطهٔ ۱۰-۱-۱)، در $۳۰۰°C$ چه‌مدت طول خواهدکشید؟

حل: با استفاده از رابطهٔ

$$\ln t = C + \frac{B}{T}$$

$$\ln ۱۰^۴ = ۹٫۲ = C + \frac{B}{۳۶۰ + ۲۷۳}$$

$$\ln ۱۰۰ = ۴٫۶ = C + \frac{B}{۴۹۰ + ۲۷۳}$$

با حل همزمان

$$B = ۱۷۱۰۰ \text{ K}$$

$$C = -۱۷٫۸۲$$

$$\ln t = -۱۷٫۸۲ + ۱۷۱۰۰/۵۷۳$$

$$t = ۱۷۰۰۰۰ \text{ sec} \qquad (\sim ۲ \text{ روز})$$

توضیح. این محاسبه برای سختیهای بیشتر از تقریباً $۳۵ R_C$، درحالی که ذرات کاربید هنوز کوچك و زیادند مناسب است. ▲

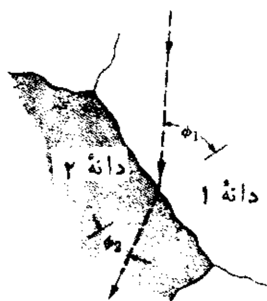
## ☐ ۱۰-۴ میکروساختارها: خواص فیزیکی

درمورد خواص فیزیکی میکروساختارهای چندفاز نمی‌توان اصل کلی بیان کرد. ولی بیان بعضی روابط مفید به‌نظر می‌رسد.

عبور نور درجامدات غیرفلزی تاحد قابل‌توجهی تحت تأثیر وجـود بیش‌از یك‌فاز قرار دارد. هر وقت اشعهٔ نوری از مرزدانه‌ای عبور می‌کند، اشعه طبق قانون اسنل شکسته می‌شود

$$n_۱ \sin \phi_۱ = n_۲ \sin \phi_۲ \qquad (۱-۴-۱۰)$$

دراینجا $n$ شاخص شکست فاز و $\phi$ زاویهٔ بین اشعه و عمود برسطح مانع است. از آنجاکه دوفـاز میکروساختار فقط وقتی کـه بـرهم منطبق باشند شاخص شکست یکسانی دارنـد، در می‌یابیم که $\phi_۱$ و $\phi_۲$ معمولا متفاوت‌اند و درنتیجه هرزمانی که نور از مرز فازها عبور کند شکسته می‌شود (شکل ۱۰-۴-۱). این‌امر به‌جای شفافیت موجب پراکندگی و مـاتی




**شکل ۱۰-۴-۱** نفوذ نور. میکروسـاختـارهـایی که فازهای شفاف دارند نور را پراکنده و جذب می‌کنند، زیرا نور در مرز دانه‌ها و مرز فازهـا شکسته می‌شود. قانون اسنل (رابطهٔ ۱۰-۴-۱) دراین‌مورد به‌کار می‌رود؛ ولی وقتی تعداد مرزها بیشمار باشد، شفافیتی در مـاده مشاهده نمی‌شود.

می‌شود. بنابراین موادی که فازهای شفاف دارند مثل آجر و بتن نور را از خود عبور نمی‌دهند زیرا نور پراکنده می‌شود و عاقبت قبل از کامل کردن مسیر خود از میان ماده، از بین می‌رود.

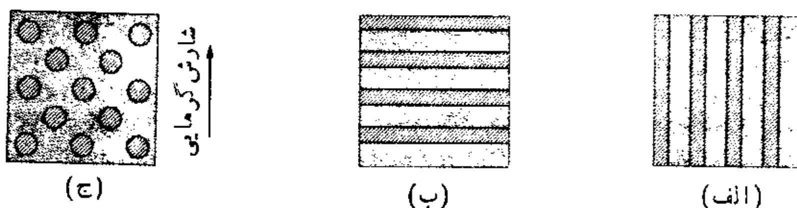
ظرفیتهای گرمایی، C، بیشتر فلزات و بسیاری از سرامیکها در در دمای معمولی تقریباً $25\ g/mole\ ^\circ C$ (یا $6\ cal/mole\cdot{}^\circ C$) است.* در محاسبات معمولا به‌ظرفیت براساس گرم ($J/g^\circ C$) یا براساس حجم ($J/cm^3\cdot{}^\circ C$) بیشتر توجه می‌شود زیرا معمولا حاصل کار به‌جای مول برحسب این کمیتها به‌دست می‌آید. مواد چندفاز از قاعدهٔ مخلوط ساده‌ای پیروی می‌کنند

$$c_m = f_1 c_1 + f_2 c_2 + \cdots \qquad (۱۰-۴-۲)$$

در این حالت $f$ می‌تواند برحسب کسر جرمی یا کسرحجمی باشد، به‌شرط آنکه از داده‌های ظرفیت گرمایی مربوط به‌آنها استفاده شود.

ضریب انبساط گرمایی مخلوط فازها را نیز توسط قواعد خطی مخلوط تقریب می‌زنیم. این قواعد را می‌توان به‌منظور براوردکردن به‌کار برد؛ ولی باید درنظر داشت که انبساط گرمایی جزئی موجب به‌وجودآمدن تنشهای داخلی می‌شود به‌طوری که کرنش کشسان وجود خواهدداشت. در محاسبات دقیق باید تصحیحات مربوط به‌آن انجام شود.

رسانندگی الکتریکی و گرمایی هردو به‌شکل هندسی میکروساختار بستگی دارند. دووضعیت فوق‌العاده درشکل ۱۰-۴-۲ دیده می‌شود. ضریب رسانندگی گرمایی $k$ را درنظر بگیرید. درشکل ۱۰-۴-۲(الف) رسانش به‌موازات ساختارانجام می‌شود؛ بنابراین رابطهٔ زیر به‌کار می‌رود




**شکل ۱۰-۴-۲** رسانندگی برحسب توزیع فازها (به‌صورت ایدئال). الف) رسانندگی موازی (رابطهٔ ۱۰-۴-۳)؛ ب) رسانندگی سری (رابطهٔ ۱۰-۴-۴)؛ ج) رسانندگی از میان ماده‌ای که فاز پراکنده دارد (روابط ۱۰-۴-۶ و ۱۰-۴-۷ درحالتی که دوفاز رسانندگی کاملا متفاوتی داشته باشند).

---

* مقدار کلی $\sim 25\ J/mole.^\circ C$ مربوط به‌ماده‌ای است که خمش پیوندیاچرخش پیوندندارد. ازآنجاکه بیشتر پلی‌مرها و بسیاری از شیشه‌ها به‌این‌صورت انرژی جذب می‌کنند، ظرفیت گرمایی آنها به‌همین نسبت بیشتراست. همچنین وقتی دما از $\sim 0.2\,T_m$ کمتر می‌شود، ظرفیت گرمایی از $\sim 25\ J/mole.^\circ C$ پایینترمی‌آید.

$$k_{\parallel}=f_{1}k_{1}+f_{2}k_{2}+\cdots \qquad (۱۰-۴-۳)$$

ساختار درشکل ۱۰-۴-۲(ب) به‌صورت سری است، بنابراین گرما باید به‌صورت عمود برلایه‌ها هدایت شود. دراین حالت قاعدهٔ عکس مخلوط برای رسانندگی ساختار چندفاز به‌کار می‌رود

$$\frac{1}{k_{\perp}}=\frac{f_{1}}{k_{1}}+\frac{f_{2}}{k_{2}}+\cdots \qquad (۱۰-۴-۴)^{*}$$

در این دورابطه، $f$ کسر حجمی‌است.

میکروساختارهای معمولیترشامل پراکندگی‌دویا چندفاز می‌شوند [شکل ۱۰-۲-۲ (ب)]. علاوه‌براین، حتی ساختاری لایه‌ای مثل‌پرلیت جهتگیری تصادفی مجتمعهای پرلیت را دارد. در درجهٔ اول می‌توان تغییر رسانندگی این میکروساختارها را تقریباً به‌صورت خطی براساس‌کسرحجمی درنظرگرفت. ولی اگر یکی از دوفازبه‌صورت پیوسته، c، باشد و دیگری به‌صورت پراکنده، d، بار دیگر اصلاحاتی باید انجام داد. اگر $k_{c}\ll k_{d}$

$$k_{m}\approx\frac{k_{c}(1+2f_{d})}{(1-f_{d})} \qquad (۱۰-۴-۶)$$

اگر $k_{c}\gg k_{d}$

$$k_{m}\approx\frac{k_{c}(1-f_{d})}{(1+f_{d}/2)} \qquad (۱۰-۴-۷)$$

در این روابط، $f_{c}$ و $f_{d}$ به‌ترتیب کسر حجمی فازهای پیوسته و پراکنده‌اند. نقش تعیین کنندهٔ فاز پیوسته، حتی‌اگر کم باشد، آشکاراست. اگر رسانندگی آن زیاد باشد، مسیری برای انتقال گرما (یا برق) است. اگر فاز پیوسته عایق باشد، انتقال محدود است، حتی اگر مقدار فاز پراکنده بسیار رسانا در آن زیاد باشد.

---

* برای رسانندگی الکتریکی σ، رابطه‌ای که درمورد مجموعهٔ سری به‌کار می‌رود بدین‌صورت است

$$\frac{1}{\sigma_{\perp}}=\frac{f_{1}}{\sigma_{1}}+\frac{f_{2}}{\sigma_{2}}+\ldots \qquad (۱۰-۴-۵\text{، الف})$$

یا برای مقاومت ویژهٔ ρ، رابطه به‌صورت زیر است

$$\rho_{\perp}=f_{1}\rho_{1}+f_{2}\rho_{2}+\ldots \qquad (۱۰-۴-۵\text{، ب})$$

این رابطه به‌رابطهٔ آشنای مقاومت $R$ برای مقاومتهای سری، که درمحاسبات فیزیك با آن برخورد کرده‌ایم، مربوط می‌شود.

**مثال ۱۰-۴-۱** دمای ۱۵۰ گرم لحیم $80\,Pb-20\,Sn$ از $180^\circ$ به $20^\circ C$ می‌رسد. **گرمای آزاد شده تقریباً چقدر است؟**

حل: مبنا $25\,J/mole\cdot{}^\circ C$

$$Pb: \frac{25\,J}{207.2\,g\cdot{}^\circ C}=\frac{0.121\,J}{g\cdot{}^\circ C}$$

$$Sn: \frac{25\,J}{118.7\,g\cdot{}^\circ C}=\frac{0.211\,J}{g\cdot{}^\circ C}$$

از آنجا که به‌ترتیب ۳۰ و ۱۲۰ گرم سرب وقلع داریم

$$\text{گرمای آزاد شده} = [(0.121)(120)+(0.211)(30)\,J/{}^\circ C][-160^\circ C]$$
$$= -3.3\,kJ$$

توضیح. ظرفیت گرمایی $(J/g\cdot{}^\circ C)$ لحیم دوفاز را می‌توان برای $20^\circ C$ به‌صورت زیر محاسبه کرد

$$c_m=(0.8)(0.121)+(0.2)(0.211)$$
$$=\frac{0.14\,J}{g\cdot{}^\circ C}$$

زیرا $\alpha$ و $\beta$ در آن دما اساساً Pb و Sn خالص‌اند. در دمای بالاتر مقدار بیشتری $\alpha$ وجود دارد، ولی $c_\alpha$ طبق آن تغییر می‌کند، زیرا حاوی قلع بیشتری است. ▲

**مثال ۱۰-۴-۲** پنجاه درصد وزنی گرد $SiO_2$ (گرد کوارتز) به‌عنوان مادهٔ پرکننده به‌رزین فنل-فرم آلدئید اضافه می‌شود. الف) چگالی مخلوط چقدر است؟ ب) رسانندگی گرمایی آن چقدر است؟

جواب: از پیوست (ج)

$$\rho_{SiO_2}=2.65\,Mg/m^3 \qquad \rho_{pf}=1.3\,Mg/m^3$$

$$k_{SiO_2}=\frac{0.012(W/mm^2)}{{}^\circ C/mm}$$

$$k_{pf}=\frac{0.00016(W/mm^2)}{{}^\circ C/mm}$$

(مبنا: ۱۰۰ گرم، و چگالی به‌ترتیب $2.65\,g/cm^3$ و $1.3\,g/cm^3$)

الف)

$$۵۰\,g\ SiO_۲ = ۱۸٫۸\,cm^۳\ SiO_۲ \qquad f_{SiO_۲} = ۰٫۳۳$$

$$۵۰\,g\ pf \quad = \underline{۳۸٫۴\,cm^۳}\ pf \qquad f_{pf} = \underline{۰٫۶۷}$$

$$۵۷٫۲\,cm^۳ \qquad\qquad ۱٫۰$$

$$\rho_m = \frac{۱۰۰\,g}{۵۷٫۲\,cm^۳} = ۱٫۷۵\,g/cm^۳$$

یا

$$\rho_m = (۰٫۳۳)(۲٫۶۵) + (۰٫۶۷)(۱٫۳) = ۱٫۷۵ g/cm^۳$$

ب) ازآنجا که $k_{pf} \ll k_{SiO_۲}$

$$k_m \simeq k_c\left(\frac{۱+۲f_d}{۱-f_d}\right)$$

$$k_m \simeq ۰٫۰۰۰۱۶\left[\frac{۱+۲(۰٫۳۳)}{۱-۰٫۳۳}\right] = \frac{۰٫۰۰۰۴(W/mm^۲)}{(°C/mm)}$$ ▲

## مرور و بررسی مطالب

### خلاصه

تغییرمیکرو ساختار هرماده به‌واکنشهای فازجامدآن بستگی دارد. واکنشهای‌چندشکلی، تبلور مجدد، و رشد دانه‌ها به‌نفوذ گسترده نیاز نـدارند. حل‌شدن و رسوب‌کـردن شامل دوفاز باترکیبهایی مختلف است و بنابراین برای ادامه‌یافتن به‌نفوذ زیادی احتیاج دارد. در عملیات حل‌شدن،اتمهای جزء کمتر باید نفوذ کنند تا در تمام حلال پـراکنده شوند. هنگام رسوب‌کردن، اتمهای اضافهٔ حل‌شده باید جدا شوند وفاز جدیدی تشکیل دهند.

وقتی واکنش توسط نفوذ صورت می‌گیرد، زمان واکنش $t$ (یا عکس‌آن $R$)رامی‌توان توسط رابطهٔ آرنیوس ، $\ln t = C + B(۱/K)$ به‌دما مربوط کـرد. حتی در این‌صورت پیشرفت واکنش بسیار پیچیده است. واکنش درآغازآهسته سپس سریع ودرپایان‌باسرعت کم انجام می‌شود (شکل ۱۰ـ۱ـ۴).

واکنشهای فاز جامدی که به‌جوانه‌زنی فاز جدید نیاز دارند، بـا بالارفتن میزان فوق سرمایش سریعتر پیشرفت مـی‌کنند؛ ولی به‌زودی به‌بیشینهٔ سرعت ( کـوتاهترین زمـان) می‌رسند. در دماهای‌کمتر، زمـان بیشتری لازم است زیرا نفوذ وتغییرات تـرکیب بسیار آهسته صورت می‌گیرد. این امرموجب به‌وجودآمدن منحنی C برای واکنشهای همدماشده است و پـایه‌ای برای مطـالعهٔ (۱) عواملی‌کـه برسرعت واکنش اثر می‌گذارند و (۲) میکروساختارهای حاصل‌است. بالای‌زانوی منحنی C، واکنش معمولا در مرز دانه‌هاجوانه

می‌زند و واکنشگرها به‌این مکانها نفوذ می‌کنند. دردماهای زیرخم منحنیC، جوانه‌زنی در میان دانه‌ها به‌صورت پراکنده انجام می‌شود و نفوذ لازم کاهش می‌یابد.

واکنش اوتکتوییدی شامل سه‌فاز است. در حین سردکردن معمولاً دوفاز حاصل می‌شود که از مرزدانه شروع و به‌فاز ناپدیدشوندهٔ واکنشی می‌رسد. این راه تشکیل پرلیت‌است. دراین‌حالت نفوذ بسیاری لازم است.

مارتنزیت فازی انتقالی است‌که به‌صورت میانی بین استنیت وفریت بـه‌علاوه کاربید $(\alpha+\bar{C})$ تشکیل می‌شود. آب‌دادن باید به‌حدی سریع باشدکه استنیت‌را قبل‌از آنکه‌تجزیهٔ معمولی صورت گیرد، تا دمای پایین سردکند. این فاز سخت در فرایندهای فولاد بیشتراز همه مورد توجه است. وقتی در نهایت به‌فاز پایدارتر $(\alpha+\bar{C})$ تبدیل مـی‌شود، کاربید توزیع بسیار ریزی درزمینهٔ فریت پیدا می‌کند ومیکروساختاری به‌نام مارتنزیت بازپخت شده به‌وجود می‌آید. این فاز اندکی نرمتر از مارتنزیت ولی بسیار چقرمه‌تراز‌آن است.

خواص که به‌طور اصلی به‌مقدار نسبی فازها مربوط می‌شود را می‌توان باقواعدمخلوط شرح داد. گاهی به‌صورت افزایشی درنظر‌گرفته می‌شوند. سایرخواص پیچیده‌ترند، زیرا رفتار یك فاز تحت تأثیر فازهای مجاورآن قرار می‌گیرد. می‌توانیم اثـرات‌کیفی مقدار فاز، اندازهٔ فاز و شکل فاز وتوزیع آن‌را با آزمایش خواص فـولادهای تـابکاری‌شدهٔ مختلف مشاهده‌کنیم (شکلهای ۱۰ــ۳ــ۳ تا ۱۰ــ۳ــ۱۰).

## سؤالات تشریحی

۱. کدامیك از واکنشهای چند شکلی زیر به‌کمترین انرژی فعالسازی نیاز خواهد داشت؟ کدامیك بـه‌بیشترین انـرژی نیـاز دارد؟ چـرا؟ الف) BccFe → fccFe، ب) الماس← گرافیت؛ ج) $BaTiO_3$ راست‌وجهی ← $BaTiO_3$ مکعبی.

۲. برنج تابکاری‌شده‌ای گرم می‌شود تااندازهٔ متوسط دانه‌های آن به‌1mm برسد. نمونهٔ دیگری از همین برنج ۵٪ سردکاری می‌شود. به‌همان‌مدت در همان دما گرم می‌شود. اندازهٔ متوسط دانه‌ها 10mm است نمونهٔ سومی۲۰٪کار سردمی‌شود. اندازهٔدانه‌های آن پس‌از عملیات‌گرمایی مشابهی 3mm است. دلایل منطقی این نتایج‌را بنویسید.

۳. مسی‌که تغییرشکل بسیاری یـافته $(CW>\%80)$ دردمایی پـایینترازمسی‌کـه اندکی تغییرشکل یافته $(CW<\%20)$ تبلور مجدد می‌یابد. چرا؟

۴. بامراجعه به‌پاراگراف ۲ بخش۱۰ــ۱، بیان‌کنیدکه چگونه سرعت واکنشها تحت‌تأثیر جنبه‌هایی‌که درهرمورد گفته شده است قرار می‌گیرد؟

۵. رسوب در حالت جامد را برای دانشجویی‌که شیمی دانشگاهی راگذرانده ولـی این درس را نگرفته است شرح دهید.

۶. سه‌منحنی شکل۱۰ــ۱ــ۵ را برای همکلاسی خود شرح دهید.

۷. چرا واکنشهای اوتکتوییدی معمولاً بیشتر از واکنشهای چند شکلی به‌زمان نیاز دارند؟

۸. چرا برای تشکیل پرلیت از استنیت به‌زمان نیاز است؟

۹. در دمای $500^\circ C$ استنیت درزمان کمتری تجزیه و به$(\alpha+\bar{C})$ تبدیل می‌شودتا در دمای $700^\circ C$ یا $300^\circ C$. دلایلی بر اساس شکل ۱۰ــ۱ــ۷ ارائه دهید.
۱۰. چرا مارتنزیت بیشتر از فریت در مقابل لغزش مقاومت می‌کند؟
۱۱. به‌زبان خود شرح دهیدکه چرا تشکیل مارتنزیت به‌زمان بستگی ندارد.
۱۲. اگر درصد وزنی کربن ۵ر۰ باشد، ساختار bct مارتنزیت در هر سلول واحد حاوی دواتم آهن ودرآن $c=0.291\,nm$ و $a=0.285\,nm$ است. مکانهـای درون سلول واحد راکه درآنها اتمهای کربن می‌توانند با کمترین کرنش وجودداشته‌باشند معین کنید.
۱۳. رابطهٔ ۱۰ــ۱ــ۷ همان‌طور که نوشته شده برگشت ناپذیر است. تحت چه شـرایطی استنیت می‌تواند از $(\alpha+\bar{C})$ یا از M مجدداً تشکیل شود؟ (یـادداشت: بـرگشت مستقیم $(\alpha+\bar{C})$ به‌M هرگز مشاهده نمی‌شود یا انتظارآن نمی‌رود. چرا؟)
۱۴. چرا $Fe_3C$ به‌فریت استحکام می‌بخشد، حتی اگرکاربید به‌حدی ترد باشدکـه «مثل شیشه بشکند»؟
۱۵. چرا پرلیت ریز بیشتر از پرلیت درشت استحکام دارد؟
۱۶. خواص مشترك پرلیت وساختارکروی (شکل ۱۰ــ۲ــ۲) را ذکرکنید؛ خواص متفاوت آنها را ذکرکنید. دلایل انتخاب خود را شرح دهید.
۱۷. ساختارهای زیر را باهم مقایسه‌کنید. الف) پرلیت؛ ب) مارتنزیت؛ و ج) مارتنزیت باز پخت شده. تفاوت بین فاز و میکروساختار را شرح دهید.
۱۸. رشد ذرات کاربید در شکل ۱۰ــ۲ــ۱ مستقیماً بـا مکـانیسمهای رشد بخشهای ۶ــ۷ و ۱۰ــ۱ قابل مقایسه نیست. در عوض به‌مکـانیسمهای حل‌شدن و رسوب مـربوط می‌شود. علت را شرح دهید.
۱۹. تیغهٔ ارهٔ آهن‌بری حاوی مقدارکافی کربن‌است به‌طوری‌که سختی آن پس‌ازآب‌دادن به‌بیشتراز $60R_C$ می‌رسد و قبل از استفـاده بـاز پخت می‌شود. درنتیجه سختی آن به‌کمتراز $60R_C$ می‌رسد. بازپخت چگونه برتوانایی تیغهٔ فولادی برای بریدن‌فولاد دیگر اثر می‌گذارد؟
۲۰. براساس اطلاعات این فصل روشی برای به‌وجودآوردن ساختارکروی پیشنهادکنید.
۲۱. عرض متوسط لایهٔ فریت را می‌توان درشکل ۱۰ــ۲ــ۲ (الف) اندازه‌گیری کـرد. قبل‌ازآنکه استحکام تسلیم آن‌را از شکل ۱۰ــ۳ــ۷ تخمین بزنیم چه اصلاحی باید در این داده‌ها انجام پذیرد؟
۲۲. آلیاژ95Al-5Cu به‌آهستگی سرد شده به‌طوری‌کـه $\theta$، شبکه‌ای درمرز دانه‌های κ تشکیل داده است. براساس شکل ۹ــ۵ــ۳ و بخشهای ۶ــ۴ و ۸ــ۷ خواص‌مکانیکی مختلف آن‌را پیش‌بینی کنید.
۲۳. دلیل منفی‌بودن شیب منحنیهای شکل ۱۰ــ۳ــ۴ را برای همکلاسی خود شرح دهید.
۲۴. برای دانشجوی سال اول شیمی دلیل‌منفی بـودن شیب منحنیهای شکل ۱۰ــ۳ــ۹ را

شرح دهید.

۲۵. دلیلی برای استفاده از فرضیهٔ آرنیوس در مثال ۱۰–۳–۲ ارائه دهید.

۲۶. یاتاقانهای مفرغی«بدون روغن» توسط تفجوشی گرد مفرغ ساخته می‌شوند تا تخلخلی برابر ۱۰v/o–۲۰v/o داشته باشند. چه قاعدهٔ مخلوطی، چگالی آنها را به‌بهترین وجه شرح می‌دهد؟ رسانندگی گرمایی آنها را چطور؟

## مسائل

۱۰–۱–۱ با مراجعه بـه‌مثال ۱۰–۱–۱، در چه دمایـی انـدازهٔ دانه در ۱۵ ساعت از ۰٫۰۵mm تا ۰٫۱۰mm رشد می‌کند؟

جواب: $625\ ^\circ\mathrm{C}$

□ ۱۰–۱–۲ داده‌های شکل ۱۰–۱–۱ از رابطهٔ زیر تبعیت می‌کنند

$$\ln\delta = C + n\ln t \quad (\text{یا } \delta \propto t^n)$$

بدون آنکه به‌دما بستگی داشته باشند و تبعیت از رابطهٔ فوق تـا وقتی است کـه اندازهٔ دانه‌های $\delta$ به‌انـدازهٔ نمونه نزدیك نشود. مقدار نمـای رشد دانهٔ $n$، برای برنج در شکل ۱۰–۱–۱ چقدر است؟

۱۰–۱–۳ در شکل ۱۰–۱–۴ موارد زیر را به‌صورت تصویری حل کنید. الف) زمـان تبلور مجدد (به‌میزان ۵۰٪) برای این مس در ۷۵°C (۱۶۷°F)؛ ب) دمای لازم بـرای گرمکاری، به‌شرط آنکه تبلور مجدد درزمانی‌که مس از میان غلتکها عبور می‌کند تا ۵۰٪ کامل شده باشد (۰٫۰۶sec~).

جواب:

الف) ۱۰۰۰min(۱۷hrs) ب) $1/T = \sim 0.00165$ ، $T = \sim 605\mathrm{K} = \sim 330^\circ\mathrm{C}$

**۱۰–۱–۴** مسئلهٔ ۱۰–۱–۳ را از طریق محاسبه حل کنید. (به مثال ۶–۶–۲ رجوع کنید.)

۱۰–۱–۵ عملیات محلولی آلیاژ ۹۵Al–۵Cu در ۵۵۰°C انجام شده است و سپس به‌سرعت تا ۴۰۰°C سرد شده و ۲۴ ساعت درآن دمـا نگه داشته مـی‌شود. دراین مدت میکروساختاری ایجاد می‌شودکـه درهر $\mathrm{mm}^3$، $10^6$ ذرهٔ $\theta$ دارد. ذرات $\theta$ $(CuAl_2)$ تقریباً کروی و چگالی‌آنها دوبرابر چگالی زمینهٔ $\kappa$ است. الف) این ذرات تقریباً چقدر از یکدیگر فاصله دارند؟ ب) اندازهٔ متوسط ذرات چقدر است؟

جواب: الف) ۱۰μm~ ب) ۳٫۸μm

۱۰–۱–۶ میکروساختاری دارای ذرات کـروی $\beta$ باابعاد متوسط $\bar{d}$ است، که $\bar{d}$ ۱۰٪ فاصلهٔ متوسط $\bar{D}$ بین مراکز ذرات مـجاور، است. الف) درصد حجمی $\beta$ چقدر است؟ ب) نسبت $\bar{d}/\bar{D}$ با ۰٫۵v/o $\beta$ چقدر است؟

**۱۰-۱-۷** لحیم $90\,Pb-10\,Sn$ در $185°C$ نگـه داشته شده تـا تعادل بـرقرار شود. اندازهٔ متوسط دانه $10^6\,\mu m^3$ است. آلیاژ سپس به‌سرعت تـا دمای اتاق سرد شده و در آن رسوب $\beta$ در داخل دانه‌های اولیهٔ $\alpha$ تشکیل می‌شود. زمینهٔ حـاصل در داخل ذرات اولیهٔ $\alpha$ $99\,Pb-1\,Sn$ $(\rho = 13.3\,Mg/m^3)$ است وذرات $\beta$ $(\sim\%100\,Sn)$ بافاصلهٔ متوسط $0.1\,\mu m$ ازهم قرار دارند. الف) چه‌تعداد ذره به‌ازای هردانهٔ اولیه وجود دارد؟ ب) کسرحجمی $\beta$ چقدر است؟ ج) تقریباً چنداتم قلع به‌ازای هر ذرهٔ $\beta$ وجود دارد؟

جواب: الف) $\sim 10^9$؛ ب) $15\,v/o$؛ ج) $\sim 5 \times 10^6\,Sn$

**۱۰-۱-۸** پس از انجام عملیات محلولی نقره استرلینگ $(92.5\,Ag-7.5\,Cu)$ آن را آب داده، و سپس دوباره تا $400°C$ گرم می‌کنند تا تعادل به‌دست آید؛ درحـالت تعادل حاوی رسوب $\beta$ (تقریباً به‌شکل کـروی) در زمینهٔ $\alpha$ است. الف) اگر اندازهٔ تعیین‌کننده $d$ مربوط به‌ذرات $\beta$، $0.1\,\mu m$ بـاشد، در هر $mm^3$ چقدرازآن وجود خواهد داشت؟ اگر $d = 0.05\,\mu m$ باشد چطور؟ ب) فاصلهٔ متوسط بین ذرات چقدر است؟

**۱۰-۱-۹** الف) واکنش اوتکتویید در سیستم $Fe-O$ (شکل ۹-۵-۵) را مشخص کنید. ب) چه‌مقدارآهن فلزی در دمای کمتراز اوتکتویید در محصول دوفازی وجود دارد؟

جواب: ب) $16\,w/o$

**۱۰-۱-۱۰** عملیات محلولی اکسیدی حـاوی $75\,w/o$ آهن و $25\,w/o$ اکسیژن، در $1300°C$ $(2370°F)$ انجام شده سپس به‌آهستگی تا دمای اتاق سرد شده است. واکنشها و میکروساختارهای ممکن را بـا آنهایی کـه پس‌از آهسته سردکردن فـولاد ۱۰۶۰ از $900°C$ $(1650°F)$ به‌دست می‌آید مقایسه‌کنید.

**۱۰-۱-۱۱** بـا مراجعه به‌مسئله ۱۰-۱-۹، نسبت $Fe^{3+}/Fe^{2+}$ دراکسیدی‌کـه ترکیب اوتکتویید دارد چقدراست؟

جواب: ۰٫۱۳

**۱۰-۱-۱۲** بـا مراجعه به‌نمودار $Cu-Sn$ درفصل ۹، واکنشهـای (درحین سردکردن) چهار تبدیل اوتکتویید را معین و محل‌آنها را مشخص کنید.

**۱۰-۱-۱۳** با مراجعه به‌سؤال تشریحی ۱۲، چگالی مارتنزیتی را که حاوی $0.5\,w/o$ کربن است حساب‌کنید.

جواب: $7.89\,Mg/m^3$ $(= 7.89\,g/cm^3)$

**۱۰-۲-۱** آلیاژی از $Al-Cu$ حاوی $2.5\,v/o$ $\theta$ $(\rho = 5.5\,Mg/m^3)$ در زمینهٔ $\kappa$ است که این زمینه اساساً آلومینیم خالص است. چگالی آلیاژ چقدر است؟

جواب: ۲٫۷۷ $Mg/m^3$ (۲٫۷۷ $g/cm^3$ =)

**۱۰-۲-۲** مارتنزیت بازپخت شدهٔ شکل ۱۰-۲-۱ و ساختار کروی شکل ۱۰-۲-۳(ب) ترکیب وساختار مشابهی (کاربید کروی شکل در زمینهٔ فریت) دارند. سختی ساختار کروی را با سختی دومحصول موجود درشکل ۱۰-۲-۱ مقایسه کنید. (مثال ۱۰-۲-۱ و توضیحات آن را ببینید.)

**۱۰-۲-۳** گرد سیلیس (کوارتز آسیاب شدهٔ نرم، $\rho$ = ۲٫۶۵ $Mg/m^3$ یا ۲٫۶۵ $g/cm^3$) به‌عنوان پرکننده برای پلی‌وینیل کلرید ($\rho$ = ۱٫۳ $Mg/m^3$) به‌کار می‌رود. الف) چه کسر حجمی برای به‌وجود آمدن محصولی با چگالی ۱٫۷۰ $Mg/m^3$ لازم است؟ ب) درصد وزنی $SiO_2$ چقدر است؟

جواب: الف) ۳۰ v/o $SiO_2$ ب) ۴۷ w/o $SiO_2$

**۱۰-۲-۴** چگالی میلهٔ فنل‌فرم‌آلدئید تقویت شده با شیشه را که در آن مقدار شیشه ۱۵ w/o است محاسبه کنید. (الیاف شیشهٔ مورد استفاده ازجنس بروسیلیکات است.)

**۱۰-۲-۵** چگالی آلیاژ Pb-Sn پس از رسیدن به‌تعادل در ۲۰°C، ۱۰٫۰ $Mg/m^3$ (۱۰٫۰ $g/cm^3$ =) است. الف) کسر حجمی $\beta$ چقدر است؟ ب) درصد Sn چقدر است؟

جواب: الف) ۲۳ v/o $\beta$ ب) ۲۴ w/o Sn

**۱۰-۳-۱** فرض کنید که نمونه‌ای تصادفی از پرلیت موجود درشکل ۱۰-۲-۲ (الف) در محیطی به‌وجود آید. سختی آن را براساس داده‌های شکل ۱۰-۳-۸ تخمین بزنید.

جواب: ۱۶۰~ BHN

**۱۰-۳-۲** فولاد ۱۰۴۵ در ۸۰۰°C (۱۴۷۰°F) استنیتی شده و به‌سرعت تا تشکیل ۱۰۰٪ مارتنزیت آب داده‌شده، سپس به‌مدت ۱۰ دقیقه در ۴۰۰°C بازپخت شده‌است تا $\bar{C}+\alpha$ به‌وجود آید. چگالی آن چقدر است؟

**۱۰-۳-۳** برای نرم‌کردن فولاد شکل ۱۰-۳-۹ تا $R_C$ ۶۰ باید آن را به‌مدت تقریباً ۲۵ ثانیه در ۳۰۰°C یا تقریباً ۱۵۰۰ ثانیه در ۲۰۰°C نگه داریم. فرض کنید رابطهٔ آرنیوس به‌کار رود. در ۱۰۰°C تقریباً چقدر طول خواهد کشید.

جواب: تقریباً $10^6$ ثانیه (یا ۱۳ روز)

☐ **۱۰-۴-۱** برای تبدیل فاز A ($n$ = ۱٫۶۰) به‌فاز B ($n$ = ۱٫۵۸)، شعاع نور با چه زاویه‌ای باید شکسته شود؟ (می‌توان فرض کرد که مرز فازها با شعاع نور زاویه ۴۵° می‌سازد.)

جواب: $0{,}7^{\circ}$

☐ ۱۰-۴-۲ ظرفیت گرمایی فلزات خالص(+۹۹) درپیوست (ج) را برحسب $J/g.^{\circ}C$ تخمین بزنید.

☐ **۱۰-۴-۳** چگالی $CaF_2$، $3{,}2\ Mg/m^3$ ($=3{,}2 g/cm^3$) است. ظرفیت گرمایی آن، برحسب $J/m^3.^{\circ}C$، چقدر است؟

**جواب: تقریباً $3\ MJ/m^3.^{\circ}C$**

☐ **۱۰-۴-۴** ابزاری برشی ازکاربید سمانتهٔ حاوی $60\ v/o$ TiC ($c=0{,}8 J/g.^{\circ}C$) و $40\ v/o$ نیکل است. با استفاده از دادههای لازم در پیوستها، ظرفیت گرمایی آن را (برحسب $J/cm^3.^{\circ}C$) تخمین بزنید.

☐ ۱۰-۴-۵ رسانندگی گرمایی (طولی) پلاستیك تقویت‌شده مسئلهٔ ۱۰-۲-۴ را تخمین بزنید.

جواب: $0{,}0002 (W/mm^2)/(^{\circ}C/mm)$

**۱۰-۴-۶** حفاظی در برابر تشعشع، با استفاده از گرد سرب ($90\ w/o$) به عنوان پرکننده در پلی‌استیرن ساخته شده است. این مخلوط سپس در بالای $T_g$ پلی‌استیرن پرس‌شده است. الف) کسرحجمی سرب چقدر است؟ ب) چگالـی حفاظ چقدر است؟ ☐ ج) رسانندگی گرمایی‌آن را تخمین بزنید.

۱۰-۴-۷ مکعبی (به‌ضلع ۲۵ میلی‌متر) با رویهم قراردادن لایه‌هایی ازورق‌آلومینیم و لاستیك وولکانـی شده (به‌ترتیب $0{,}5 mm$ و $0{,}75 mm$ ضخامت)، بـه‌طور متناوب به‌وجود آمده است. رسانندگی گرمایی این لایه‌ها الف) به‌موازات و ب) عمودبر ورقها چقدر است؟ (از داده‌های پیوست (ج) استفاده کنید.)
جواب:

الف) $0{,}09 (W/mm^2)/(^{\circ}C/mm)$ ب) $0{,}0002 (W/mm^2)/(^{\circ}C/mm)$

**۱۰-۴-۸** $2 v/o$ $Al_2O_3$ در داخل آلومینیم به‌صورت ذرات بسیار ریز ($<0{,}1 \mu m$) بیشمار ($>10^9/mm^3$) تـا حد قـابل‌مـلاحظه‌ای استحکام فلز را افـزایش مـی‌دهد. الف $Al_2O_3$ چقدر (چند درصد) چگالی را تغییر می‌دهد؟ ☐ ب) $Al_2O_3$ چقدر (چند درصد) رسانندگی گرمایی را تغییر می‌دهد؟ رسانندگی الکتریکی را چطور؟

# ۱۱

# مواد چندفاز: عملیات گرمایی

## چشم‌انداز فصل

ازدیرباز صنعتگران دریافته بودندکه مواد دراثر گرم‌شدن و بسته به‌روشی که پس ازآن سرد می‌شوند تغییر می کنند. آنان با وجودآنکه نمی‌دانستند دقیقاً در داخل ماده چه‌رخ‌می‌دهد، فرایندهای مختلف عملیات گرمایی را نامگذاری کرده‌بودند. این تغییرات میکروساختاری اکنون شناخته شده است. درنتیجه، ارتباط‌دادن دو موضوع فرایندهای گرمایی و میکروساختار به‌ما کمک‌خواهدکرد زیرا دراین صورت بهتر مـی‌توانیم روشهای کـار را تشریح کنیم و استفاده از آنها را بهینه سازیم. بنابراین‌می‌توانیم خواص نهایی را بهتر کنترل کنیم. درك تغییرات‌ساختار داخلی، به‌فرایندهای جدیدی منجر می‌شود و کاربردهای‌مهندسی بیشتری برای بسیاری از مواد ایجاد می کند.

## هدف از مطالعه

۱. تفسیر تغییرات ساختاری که درحین تابکاری مواد مختلف صورت می‌گیرد، و پیش‌بینی تغییرات حاصل از آن درخواص.

۲. ارتباط دادن مراحل عملیات گرمایی پیرسختی (رسوب سختی) و فرتوت‌سازی (الف) به حدحلالیت نمودارهای فازی، و (ب) به تغییرات میکروساختاری رشد و گسترش ذرات.

۳. پیش‌بینی زمان لازم برای پیرسختی با استفاده از محاسبات آرنیوس.

۴. درک نمودارهای تبدیل همدمای فولاد به‌طوری که بتوانید (الف) از آنها برای پیش‌بینی سرعت واکنشها استفاده کنید، (ب) تغییرات را نسبت به تغییرمیزان کربن، عناصر آلیاژی افزوده شده، و انـدازهٔ دانه پیش‌بینی کنید؛ و (ج) سرعتهای بحرانی سردکردن را کـه موجب ایجاد مـارتنزیت تنها یا عدم ایجادآن می‌شوند تفسیر کنید.

۵. ارتباط دادن فرایندهای عملیات فولاد تجارتی به‌مجموعه‌های زمان ـ دما ـ تبدیل.

☐ ۶. استفاده ازمنحنیهای سختی‌پذیری برای‌تخمین مقادیرسختی محصولات فولادی مهم، و درك علت تفاوت بین‌منحنیهای سختی‌پذیری.

## ۱۱-۱ فرایندهای تابکاری

صنعتگران در گرم کردن بعضی مواد تا دماهای بالاکـه پس‌ازآن معمولا فلز به آهستگی سرد می‌شود (برخلاف آب‌دادن) مزایایی یافتند.

فوایدتابکاری از ماده‌ای به‌مادهٔ دیگرتفاوت دارد. شیشه تابکاری و سپس به‌آهستگی سرد می‌شود تا امکان ترك برداشتن بعدی‌آن کاهش یابد. تابکاری، سختی محصول شیشه‌ای را تغییر نمی‌دهد. برنج سردکاری شده‌برای نرم‌شدن تابکاری می‌شود. اکنون می‌دانیم که برنج درحین تابکاری تبلور مجدد می‌یابد (بخش ۶ـ۶). البته این‌عمل درشیشه نمی‌تواند رخ دهد زیرا شیشه هم‌قبل وهم بعداز تـابکاری نابلورین است (بخش ۸ـ۵). تـابکاری انعطاف‌پذیری‌چدن را بالامی‌برد واغلب‌این‌نتیجه به‌دست‌می‌آیدکه نرمی باانعطاف‌پذیری مترادف است. این امر درمورد برنج که دربالا ذکرشد صحت دارد؛ ولی فولادها و سایر آلیاژهای چندفاز تابکاری شده دراین حالت نسبت به‌عملیات گرمایی دیگر انعطاف‌پذیری کمتری دارند.

تابکاری را نمی‌توان برحسب خواص حاصل تعریف کرد. بلکه فرایندی است کـه توسط آن ماده مدت مدیدی گرم و سپس به‌آهستگی سرد می‌شود. برای پیش‌بینی خواص

مادهٔ حاصل از این عملیات گرمایی باید هریك از مواد را به‌طور جداگانه بررسی کرد.
طرح زیرهدف و نتیجهٔ چندین عملیات تابکاری معمول را همراه با نیازهای فنی مطرح می‌کند. «نام تجارتی» هرعملیات گرمایی با حروف‌سیاه نوشته شده است.

**تابکاری**

ماده: شیشه.

هدف: ازبین‌بردن تنشهای باقیمانده، و اجتناب از ترك گرمایی. (محصول اولیه و نهایی سختی یکسانی دارند.)

روش: برحسب ترکیب شیشه فرق می‌کند زیرا برای ازبین رفتن تنش باید به‌دمای تبدیل شیشه‌ای، $T_g$، نزدیك شد. صنعتگران‌شیشه، دمایی‌را انتخاب می‌کنندکه در آن ویسکوزیتهٔ $\eta$ به $10^{12}$ Pa . s ‏(‎$10^{13}$ پواز) برسد. تابکاری‌دراین نقطه بدون‌آنکه تغییرشکلی ایجاد کند، در عرض چند دقیقه موجب تنشگیری خواهد شد. شیشه باید به‌آهستگی سرد شود و از نقطهٔ کرنش که درآن ویسکوزیته $10^{13.5}$ Pa . s ‏(‎$10^{14.5}$ پواز) است، بگذرد. سردکردن آهسته از ایجاد تنشهای گرمایی جدید جلوگیری می‌کند. زیر دمای نقطهٔ‌کرنش که درآن ویسکوزیته تا ۳۰ برابر افزایش می‌یابد، شیشه را می‌توان سریع سردکرد، زیرا تنش باقیماندهٔ جدیدی نمی‌تواند ایجاد شود.

تغییرات میکروساختاری: هیچ

**تنشگیری**

مواد: هرنوع فلز و به‌ویژه فولادها که‌تغییرحجم آنها در حین‌تبدیل، به‌طورناپیوسته صورت می‌گیرد.

هدف: از بین‌بردن تنش باقیمانده (مثل شیشهٔ تابکاری شده)؛ گرچه بیشتر فلزات در معرض ایجاد ترك گرمایی قرار نمی‌گیرند. اما اگر ماشینکاری تنشها را به‌طور غیرقرینه ازبین ببرد خطر اعوجاج و تاب برداشتن وجود دارد.

روش: در مورد فولادها، چند دقیقه در $\sim 600°C$‏(‎$\sim 1100°F$)، برای مراکز حجمهای بزرگ باید اضافه مجازی درنظر گرفت تا این‌دما را به‌دست‌آورند.

تغییرات میکروساختاری: هیچ

**تبلورمجدد (یا تابکاری*)**

مواد: فلزات سردکاری شده.

هدف: نرم‌کردن آن با ازبین‌بردن کرنش سختی.

روش: دمایی بین $T_m$ ۳ر۰ تا $T_m$ ۶ر۰، انتخاب می‌شود و زمانی مناسب بامراحل تولید، به‌آن داده می‌شود. تبلور مجدد در فلزات خالص سریعتر از آلیاژها صورت می‌گیرد، درمورد فلزاتی که‌کرنش ایجادشده در آنها خیلی بیشتر باشد بسیارسریعتر است (بخش ۶ـ۶). (ورق و سیم‌فولادی نباید بالای دمای اوتکتوئید تبلور مجدد یابند، مگر آنکه برای آهسته سردکردن آنها دقت مخصوصی مبذول شود. در غیر این‌صورت، ممکن است مارتنزیت ترد تشکیل شود.)

تغییرات میکروساختاری: دانه‌های جدید (شکل ۶ـ۶ـ۱ و ۱۰ـ۱ـ۳).

**تابکاری کامل**

مواد: فولادها.

هدف: نرم‌کردن قبل‌از ماشینکاری.

روش: استنیتی‌کردن در ۳۰°C‌ـ۲۵°C (۵۰°F) بالای‌دمای‌پایداری آخرین‌قسمت فریت (شکل ۱۱ـ۱ـ۱). این کار باسردکردن درکوره دنبال می‌شود تا استنیت تجزیه و به‌پرلیت درشت تبدیل شود. محصول به‌حدکافی نرم است به‌طوری‌که‌فولاد رامی‌توان ماشینکاری کرد. فولاد تابکاری شده نسبت به‌آنچه‌که در عملیات گرمایی دیگرامکان دارد انعطاف‌پذیری‌کمتری دارد، ولی این‌کار مطلوبی‌است زیرا موجب بهترایجادشدن تراشه‌ها درحین ماشینکاری می‌شود. (این عمل نسبتاً گرانی‌است زیرا مدت قابل‌ملاحظه‌ای کوره را اشغال می‌کند.)
میکروساختار تشکیل شده : پرلیت درشت [شکل ۱۰ـ۲ـ۲ (الف)].

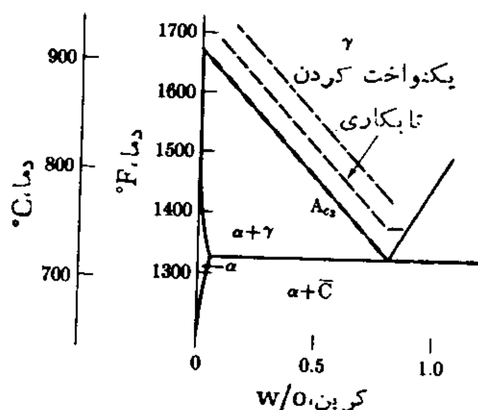
**کروی کردن**

مواد: فولادهای پرکربن مانند یاتاقانها.

هدف: چقرمه‌کردن فولادشکننده. دربعضی ازفولادها برای داشتن مقاومت در برابر سایش، مقدار کاربید باید زیاد باشد؛ بااین‌حال به‌صورت پرلیت، چقرمگی بسیار کمی خواهند داشت (شکل ۱۰ـ۳ـ۱۰).

---

* برحسب تجهیزاتی‌که به‌کار می‌رود، این فرایند ممکن‌است تابکاری جعبه‌ای، تابکاری مداوم، تابکاری مرحله‌ای، و... نامیده شود.




**شکل ۱۱-۱-۱** تابکاری و **یکنواخت‌کردن** (فولادهای کربنی ساده). دمای عملیات گرمایی به‌مقدار کربن بستگی دارد. برای تابکاری دما چنان است که جسم کاملا استنیتی شود. فولاد سپس به‌آهستگی سرد می‌شود تا پرلیت درشت و محصول نسبتاً نرمی‌حاصل شود. برای یکنواخت کردن (بخش ۱۱-۲)، فولاد قدری بیشتر گرم می‌شود تا نفوذ اتمی سریعتر صورت گیرد و ساختار یکنواخت‌تری به‌دست آید. ولی گرم‌کردن زیادی موجب رشد نامطلوب دانه‌ها می‌شود. پس‌از استنیتی شدن، فولاد یکنواخت شده در هوا سرد می‌شود تا پرلیت ریز یکنواختی به‌دست آید. هدف اصلی کم‌کردن مقدار سختی نیست. [شکل ۱۱-۲-۲ (الف) را ببینید.]

روش: اگر ساختار اولیه پرلیت باشد، ۱۶-۲۴ ساعت زیر دمای اوتکتوئید (~۷۰۰°C). اگر ساختار اولیه مارتنزیت باشد، ۱-۲ ساعت در آن دما (شکل ۱۰-۲-۱).

میکروساختار تشکیل شده: ساختار کروی [شکل ۱۰-۲-۲ (ب)].

## □ چکش‌خوارکردن

ماده: چدن. (بخش ۱۳-۱ را ببینید.)

هدف: ایجاد انعطاف‌پذیری در قطعهٔ ریختگی آهنی. این‌کار با فراهم‌آوردن شرایطی برای واکنش زیر صورت می‌گیرد

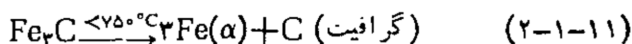


$$Fe_3C \rightarrow 3\,Fe + C\ (\text{گرافیت}) \qquad (11-1-1)$$

از آنجا که‌کاربید به‌ویژه درحضورسیلیسیم کاملا پایدار نیست، این‌واکنش صورت می‌گیرد.

روش: درصورتی‌که بخواهیم به‌بیشینهٔ انعطاف‌پذیری برسیم تابکاری درست زیر

دمای اوتکتویید انجام می‌شود. از آنجا که



$$Fe_3C \xrightarrow{<750°C} 3Fe(\alpha) + C \text{ (گرافیت)} \qquad (۱۱-۱-۲)$$

این‌کار آهن فریتی چکش‌خواری به‌وجود می‌آورد (شکل ۱۳-۱-۶). اگر دمای تابکاری بالای دمای اوتکتویید باشد



$$Fe_3C \xrightarrow{>750°C} 3Fe(\gamma) + C \text{ (گرافیت)} \qquad (۱۱-۱-۳)$$

این محصول پس‌از آنکه باسرعت معمولی سردشد به‌صورت آهن‌چکش‌خوار پرلیتی درمی‌آید، زیرا استنیت به $(\alpha + \bar{C})$ تجزیه می‌شود. محصول حاصل نسبت به‌آنچه از رابطهٔ (۱۱-۱-۲) به‌دست‌می‌آید مستحکمتر است وانعطاف‌پذیری کمتری دارد.

تغییرات میکروساختاری: خوشه‌های گرافیت تشکیل می‌شود (شکل ۱۳-۱-۶).

**مثال ۱۱-۱-۱** عملیات گرمایی مناسب برای بهتر کردن قابلیت ماشینکاری فولاد ۱۰۳۰ را انتخاب کنید.

حل: ازآنجاکه ترکیبی از انعطاف‌پذیری کم و سختی کم موردنیازاست. از تابکاری کامل استفاده کنید.

دما: ۸۵۵°C (۲۵°C-۳۰°C داخل گسترهٔ $\gamma$ کامل).

زمان: به‌اندازهٔ محصول بستگی دارد.

سردکردن: سردکردن درکوره برای ایجاد پرلیت درشت.

توضیح. گرم‌کردن تادمای بالاتر به‌سوخت بیشتری نیاز دارد و ممکن است موجب رشد نامطلوب دانه‌ها شود. ▲

## ۱۱-۲ فرایندهای یکنواخت‌کردن

در بیشتر موارد محصول یکنواخت، مطلوب‌است.* دربعضی‌موارد باعملیات گرمایی‌مربوط به‌آن، یکنواختی بیشتری به‌دست می‌آید. «نام تجارتی» این فرایندها همگن‌کردن، همدماسازی و یکنواخت‌کردن است.

---

* البته استثناهایی وجود دارد. چرخ‌دندهٔ کربن‌دهی شده تعمداً غیر یکنواخت است تا سطح پر کربن سخت و مقاوم دربرابر سایشی روی مغزهٔ فولادی چقرمه‌تر به‌وجودآید. به‌همین ترتیب جادهٔ آسفالت شده در مقیاس‌کوچك غیریکنواخت است زیرا مخلوطی از ذرات سنگ در زمینهٔ نرمی است که ترکیب کاملا متفاوتی دارد. حتی دراین حالت می‌توان خصوصیات مخلوط خوب را مشخص‌کرد تا «ناهمگنی یکنواختی» به‌وجود آید.

## همگن‌کردن (همدماسازی)

مواد: فلزات ریخته شده.

هدف: یکنواخت‌ترکردن ترکیب. در خلال انجماد، ترکیب اولین قسمت تشکیل شده با ترکیب کلی آلیاژ یکسان نیست.* این‌امر برای آلیاژ ۹۶Al–۴Cu در شکل ۱۱–۲–۱ (الف) نشان می‌دهد. نمودار فازی (شکل ۹–۵–۳) نشان می‌دهد که اولین جامد κ که‌در‌دمای ۶۵۰°C~ تشکیل می‌شود فقط ۱٪ مس دارد. با کاهش دما به‌تدریج درصد مس موجود در جامد افزایش می‌یابد. در دمای اوتکتیك، مایع ۳۳٪مس دارد (و κ حاوی تقریباً ۵ر۵٪ مس است).

روش: دما باید به‌اندازهٔ کافی بالا باشد و درضمن مایع تشکیل نشود یا رشد اضافی دانه صورت نگیرد. برخی از اتمها در مقیاس اتمی باید مسافت زیادی را نفوذ کنند (حدود ۱ر۰ میلی‌متر یا تقریباً $۱۰^۶$ سلول واحد فاصله). بنابراین لازم است فلز تاحد قابل‌ملاحظه‌ای بالاتر از دمای‌تبلور مجدد گرم‌شود تا درمدت زمان معقولی همگن شود.

تغییرات میکروساختاری: همگنی بیشتر، وشباهت بیشتر به‌نمودار فازی.



(الف)



(ب)

**شکل ۱۱–۲–۱** جدایش در هنگام انجماد، و همگن‌شدن (۹۶ Al–۴ Cu). جدانشینی ممکن است به‌دلیل‌منجمدشدن‌سریع به‌وجودآید، درحالتی‌که‌زمان‌کافی برای‌نفوذ ورسیدن به‌تعادل‌وجود نداشته‌است(شکل۹–۵–۳).الف) آلیاژ ریخته‌شده بین‌بلورهای درحال‌رشد دارای‌نواحی‌پرمس است (نواحی تاریك)؛ ب) همان‌آلیاژ پس‌از همدما شدن. مس نفوذ می‌کند تا درهردانه به‌طور یکنواخت پخش شود. (این‌دانه‌ها به‌طور متفاوتی جهتدار شده‌اند؛ بنابراین نور را به‌طور متفاوت منکعس می‌کنند و چندین رنگ خاکستری سایه‌روشن را نشان می‌دهند. در داخل هردانه همگنی کلی وجود دارد.)

---

* به‌مثال ۹–۵–۲ رجوع کنید.

**یکنواخت‌کردن**

ماده: فولاد

هدف: ایجاد میکروساختار یکنواخت، و دانهٔ ریز.

روش: استینتی‌کردن‌در ۵۰ تا ۶۰°C (۱۰۰°F) بالای‌حداستنیت وسپس سردکردن در هوا (شکل ۱۱-۱-۱). سرد کردن در هوا از جدانشینی زیاد پرواوتکتویید جلوگیری می‌کند. از آنجا که سختیهای کم مطلوب نیستند، قطعه را از کوره خارج و در هوا سرد می‌کنند تا بتوان قطعهٔ جدیدی در کوره قرار داد.

میکروساختار: پرلیت ریز، و بدون فریت حجیم پرواوتکتوییدی.

این‌فرایندها تا آنجا که به‌فولاد مربوط می‌شوند درشکل ۱۱-۲-۲ خلاصه شده‌اند. دمای عملیات گرمایی برحسب ترکیب فولاد تغییر می‌کند (شکلهای۹-۷-۳ و ۹-۹-۱).

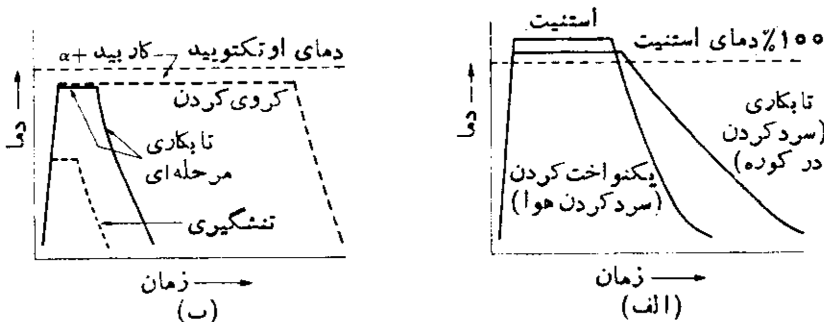
**مثال ۱۱-۲-۱** ۱۰۰ گرم آلیاژ ۹۶Al-۴Cu در ۶۲۰°C (۱۱۵۰°F) با تشکیل κ و مایع به‌تعادل می‌رسد، همان‌طورکه نمودار فازی نشان می‌دهد. آلیاژ سپس سریعاً تا ۵۵۰°C (۱۰۲۰°F) سردمی‌شود تا به‌جامداولیه فرصت واکنش داده نشود. هنوز یک‌فاز مایع وجود دارد. الف) ترکیب آن چیست؟ ب) مایع آخری چندگرم وزن دارد؟

حل: در ۶۲۰°C با استفاده ازشکل ۹-۵-۳

مایع: ۸۸Al-۱۲Cu، κ: ۹۸Al-۲Cu

$$\text{وزن مایع} = 100\,\text{g}\left(\frac{98-96}{98-88}\right) = 20 \text{ گرم مایع}$$

در ۵۵۰°C وقتی فقط ۲۰ گرم مایع واکنش انجام می‌دهد.




**شکل ۱۱-۲-۲** فرایندهای عملیات گرمایی فولاد (طرح‌وار). الف) فرایندهای استنیتی‌کردن؛ ب) فرایندهای زیر اوتکتویید.



الف) مایع : ۶۷ Al–۳۳ Cu

ب) گرم مایع ۴٫۶ = $\left(\frac{۹۴٫۴ - ۸۸}{۹۴٫۴ - ۶۷}\right)$ ۲۰ g = وزن مایع

توضیح. در ۴٫۶ گرم مایع نهایی نواحی موضعی با جدانشینی زیاد مس وجود دارد (تا ۳۳٪) و حدود ۸۰ گرم از فلز فقط ۲٪ مس دارد.

اگر سرد کردن به آهستگی و مرحله به مرحله صورت گیرد، مس محلول در مایع باقیمانده به تدریج غلیظ خواهد شد. ▲

## ۱۱–۳ فرایندهای رسوب سختی

**رسوب سختی (پیرسختی).** در اولین مراحل تشکیل رسوب از یك محلول جامد فوق اشباع ممکن است افزایش قابل توجهی در سختی به وجود آید (بخش ۱۰–۱ و رابطهٔ ۱۰–۱–۵). در واقع شروع رسوب در شکل ۱۰–۱–۷ با استفاده از این ازدیاد سختی، معین شده است. (این رسوب سختی چون با گذشت زمان ایجاد می‌شود. پیرسختی نام دارد.) شرط اصلی آلیاژی که پیرسختی می‌شود، آن است که حلالیت با کاهش دما کم شود، به‌طوری که محلول جامدفوق‌اشباعی به‌وجود آید. بسیاری از آلیاژهای فلزی این خاصیت را دارند.

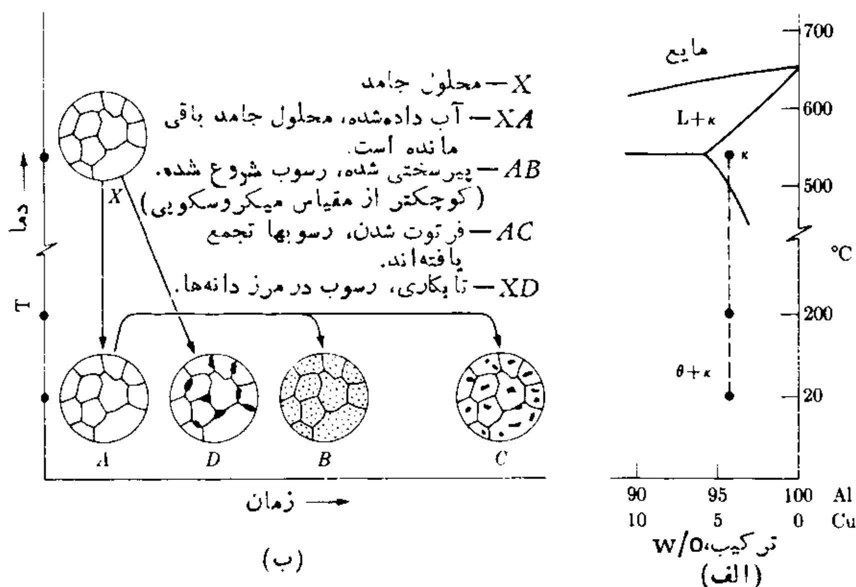
فرایند پیرسختی شامل عملیات محلولی (رابطهٔ ۱۰–۱–۴) و به‌دنبال آن آب‌دادن است تا محلول جامد فوق اشباع شود. معمولا آب‌دادن تا دمایی صورت می‌گیرد که سرعت رسوب در آن فوق‌العاده کم باشد. پس‌از آب‌دادن، آلیاژ دوباره تا دمای متوسطی* گرم می‌شود، در این دما پس‌از مدت زمان متناسبی رسوب شروع می‌شود. این دو مرحله به‌صورت $XA$ و $AB$ در شکل ۱۱–۳–۱ و جدول ۱۱–۳–۱ نشان داده شده‌اند.

خواص بهتر آلیاژ پیرسختی شده $(XAB)$ در جدول ۱۱–۳–۱ را در مقایسه با تابکاری همان آلیاژ $(XD)$، ببینید. اولی استحکام تسلیمی مساوی چندین برابر ماده تابکاری شده و همزمان انعطاف‌پذیری بیشتری دارد. در نتیجه، چقرمگی تاحد زیادی با پیرسختی افزایش می‌یابد. بیشترین انعطاف‌پذیری وقتی به‌دست می‌آید که فقط یك فاز موجود باشد، یعنی پس‌از عملیات حل کردن (به‌علاوهٔ آب‌دادن برای نگه‌داشتن تك‌فاز).

مثال جالبی درمورد استفاده از پیرسختی روشی است که در ساخت هواپیما به‌کار می‌رود. میخ پرچهای آلومینیمی اگر نرم و انعطاف‌پذیر باشند بهتر جا می‌افتند، ولی در این حال استحکام مطلوب را ندارند. بنابراین تولیدکنندگان، آلیاژی از آلومینیم را انتخاب می‌کنند که پس‌از آب‌دادن و ایجاد محلول جامدفوق اشباع، در دمای اتاق پیرسخت شود. این میخ پرچها وقتی نصب می‌شوند که هنوز نرم و انعطاف‌پذیرند. پس‌از پرچ شدن درمحل

---

* ولی زیر «زانویی» منحنی C (شکل ۱۰–۱–۷)، برای ایجاد رسوب در داخل دانه [شکل ۱۰–۱–۸ (ج)].




**شکل ۱۱-۳-۱** فرایند پیرسختی (آلیاژ Cu ٪۴–Al ٪۹۶). (جدول ۱۱-۳-۱ را ببینید.) هنگامی که بیشینهٔ سختی وجود دارد، هنوز رسوبهای تشکیل شده کوچکتر از مقیاس میکروسکوپی‌اند.

**جدول ۱۱-۳-۱** خواص آلیاژ پیرسختی‌پذیر (Cu ٪۴–Al ٪۹۶)

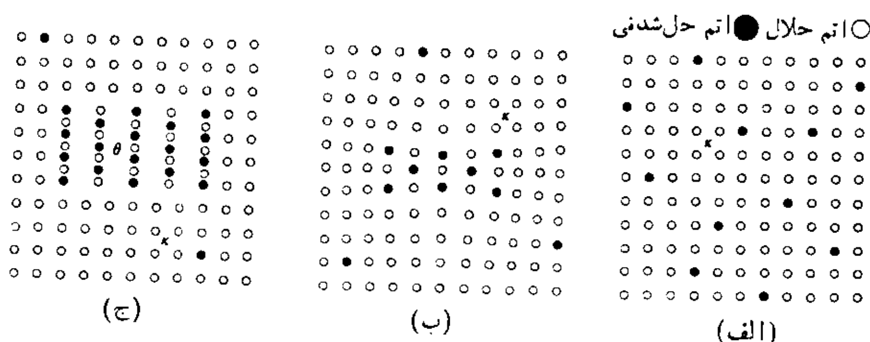
| | عملیات (شکل ۱۱-۳-۱ را ببینید) | استحکام کششی (MPa) | استحکام تسلیم (MPa) | انعطاف‌پذیری ٪ در ۵ سانتی‌متر |
|---|---|---|---|---|
| *XA* | حل‌شده (۵۴۰°C) و آب‌داده شده (۲۰°C) | ۲۴۰ | ۱۰۵ | ۴۰ |
| *XAB* | پیرسخت‌شده (۲۰۰°C، ۱ ساعت) | ۴۱۵ | ۳۱۰ | ۲۰ |
| *XAC* | فرتوت شده | ~۱۷۰ | ~۷۰ | ~۲۰ |
| *XD* | تابکاری‌شده (۵۴۰°C) | ۱۷۰ | ۷۰ | ۱۵ |

موردنظرسخت‌تر خواهندشد. از آنجاکه این آلیاژها در دمای اتاق سریعاً سخت می‌شوند، اگر تقریباً بلافاصله پس‌از عملیات حل‌شدن به‌کار نروند موجب اشکالات عملی برای به‌تأخیرانداختن فرایند سخت‌شدن خواهندشد. دراین مورد ازاثرات شناخته‌شدهٔ دما روی سرعت واکنش استفاده شده است. پس‌از عملیات حل‌شدن میخ‌پرچها در یخچال نگهداری می‌شوند تا دمای کمتر، فرایند سخت‌شدن را مدتی به‌تأخیر اندازد.

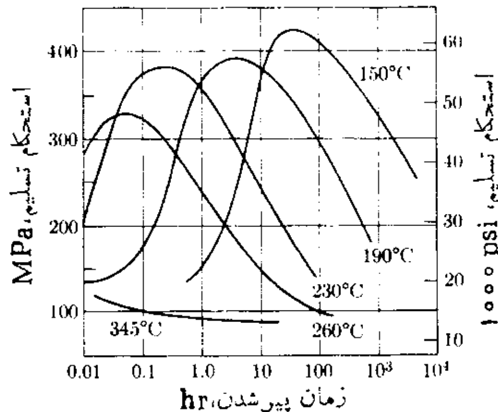
مطالعهٔ بیشتر، جزئیات پدیدهٔ پیرسختی را به‌شرح زیر نشان می‌دهد. اتمهای فوق اشباع [اتمهای مس در مثال ۱۰-۱-۲ و شکل ۱۱-۳-۱(ب)] مایل‌اند به‌صورتی که شکل ۱۱-۳-۲(ب) نشان می‌دهد، در امتداد صفحات بلوری معینی قرار گیرند، غلظت اتمهای مس (جسم حل‌شدنی) در این نواحی موجب می‌شود که در نواحی دیگری حالت فوق اشباع کمتر و ساختار بلوری پایدارتر شود. در این‌مرحله اتمهای مس هنوز یك فاز کاملا جدا تشکیل نداده‌اند و در مرز بین دوساختار همدوسی فواصل اتمی وجود دارد. حرکت نابجاییها در این نواحی دارای اعوجاج با اشکال صورت می‌گیرد و درنتیجه فلز سخت‌تر و تحت تنشهای بالا، در برابر تغییرشکل مقاومتر می‌شود.

**فرتوت شدن.** ادامهٔ فرایند جدانشینی موضعی به‌مدت‌طولانی منجر به‌تشکیل رسوب واقعی و فرتوت‌شدن یا نرم‌شدن می‌شود. مثلا درآلیاژ ۹۶٪ آلومینیم و ۴٪ مس، هنگامی ساختار واقعاً پایدار می‌شود که مس در دمای اتاق به‌طور کامل از آلومینیم fcc جدا شود. تقریباً تمام مس به‌صورت $CuAl_2$ درمی‌آید. [$\theta$ درشکل ۱۱-۳-۲(ج)]. در این‌حالت آلیاژ تاحد قابل‌ملاحظه‌ای نرم خواهدشد زیرا با رشد فاز دوم نواحی وسیعی ایجاد می‌شوند که در برابر لغزش مقاوم نیستند.

شکل ۱۱-۳-۳ داده‌های لازم برای پیرشدن وفرتوت‌شدن آلیاژ آلومینیم تجارتی




**شکل ۱۱-۳-۲** مکانیسم پیرسختی. الف) محلول جامد $\kappa$؛ ب) پیرسختی شده؛ رسوب $\theta$ شروع شده است. چون در این‌مرحله دوساختار همدوس‌اند، اطراف رسوب میدان تنشی وجود دارد؛ ج) فرتوت‌شده. دوفاز جدا و ناهمدوس $\kappa$ و $\theta$ تشکیل شده است. چون تعداد اتمهای حل‌شونده محدود است، بیشترین مانع برای حرکت نابجاییها درقسمت (ب) وجود دارد.




**شکل ۱۱-۳-۳** فرتوت‌شدن (آلومینیم T۴-۲۰۱۴). با رشد و بزرگ شدن ذرات رسوب، آلیاژ شروع به نرم‌شدن می‌کند و این در دماهای بالا سریعتر اتفاق می‌افتد.

**(۲۰۱۴)** را نشان می‌دهد. سخت‌شدن اولیه با جمع‌شدن ذرات رسوب از بین می‌رود وماده نرم می‌شود. آثار دمای پیرشدن عبارت‌اند از: (۱) در دمای بالاتر رسوب و درنتیجه سخت‌شدن بسیار سریع شروع می‌شود، (۲) در دمای بالاتر فرتوت‌شدن و درنتیجه نرم‌شدن سریعتر رخ می‌دهد. این‌دو پدیده مجموعاً بر بیشینهٔ سختی آلومینیم اثر می‌گذارند. در دماهای پایینتر سختی حاصل زیادتر ولی زمان لازم بیشتر است.

**سخت‌شدن مرکب.** گاهی بهتراست دو روش سخت‌کردن را باهم به‌کار بریم. سردکاری، آلیاژی که قبلا پیرسختی شده‌است را بازهم سخت‌تر می‌کند. ولی دراین فرایند به‌برخی اشکالات عملی برمی‌خوریم. پیرسختی مقاومت در برابر لغزش و در نتیجه انرژی لازم برای سردکاری را افزایش می‌دهد. همچنین انعطاف‌پذیری را کاهش می‌دهد و درنتیجه در حین سردکاری پارگی آسانتر صورت می‌گیرد. یکی از راه‌حلهای ممکن آن است که کار سرد قبل‌ازعملیات‌رسوب سختی‌گیرد. دراین‌صورت کار سرد راحت‌تر انجام شده‌واکنش پیرسختی‌نیز در دمای‌کمتری صورت‌می‌گیرد زیرا نابجاییها به‌عنوان جوانه برای رسوب به‌کار می‌آیند. ولی دمای فرایند پیرکردنی که پس‌از کار سرد انجام می‌شود، ممکن است مقداری از کرنش سختی را ازبین ببرد و موجب کاهش اندکی درسختی شود. گرچه در این‌حالت سختی‌به‌دست‌آمده بیشتر از سختی درحالت عکس‌آن نیست، اما سختی نهایی از آنچه هریك از این دوروش به‌تنهایی به‌دست می‌دهند، بیشتر است (جدول ۱۱-۳-۲).

☐ **فولادهای کم‌آلیاژ و پراستحکام** (HSLA). اخیراً روشهایی برای‌افزایش استحکام

**جدول ۱۱-۳-۲** استحکام کششی آلیاژ پیرسختی و کرنش سختی‌شده
($\%۹۸$ Cu-$\%۲$ Be)

| | |
|---|---|
| تابکاری شده در $۸۷۰°C$ | ۲۴۰ MPa |
| عمل حل‌شدن در $۸۷۰°C$ و سریعاً سردشده | ۵۰۰ |
| فقط پیرسختی شده | ۱۲۰۰ |
| فقط سردکاری شده ($\%۳۷$) | ۷۴۰ |
| پیرسختی، و سپس سردکاری شده* | ۱۳۸۰ |
| سردکاری و سپس پیرسختی شده | ۱۳۴۰ |

* ترك خورده است.

فولادهای کم آلیاژ ایجادشده‌که موجب به‌وجودآمدن محصولات پراستحکامتری شده‌است. گسترش این روشها موجب به‌وجود آمدن فولادهای ساختمانی با استحکام تسلیم بیش‌از ۵۰۰MPa شد. این درحالی‌است که‌فولادهای‌ساختمانی قبلی‌فقط نصف این استحکام‌را داشتند.

استحکام فولادهای HSLA به‌دلیل کوچك بودن دانه‌ها و وجود رسوبات ریز پراکنده در فریت است، به‌عبارت دیگر این رسوبات را می‌توان با آلیاژهای آلومینیم رسوب سختی‌شده‌که قبلا شرح‌داده شد، مقایسه‌کرد. باوجود این، منشأ رسوب در دومورد کاملا متفاوت است. اگر «کاربیدسازها» از قبیل وانادیم و نیوبیم در فولاد وجود داشته باشند، به‌همراه ۰٫۰۵ تا ۰٫۲۰٪ کربن‌هنوز در دماهای‌نوردگرم‌می‌توان تك‌فاز (استنیت) به‌دست‌آورد. بنابراین تیر، لوله، و... را به‌آسانی می‌توان تولید کرد. ولی هنگام تجزیهٔ استنیت و تشکیل فریت پروا و تکتوئید، کاربیدهای این عناصر آلیاژی رسوب می‌کنند. منحنی حلالیت برای یك‌فاز از نوع کاهش‌یابنده است اما تشکیل رسوب بیشتر به‌این‌خاطر است‌که کاربیدهای عناصر آلیاژی در $\alpha$ بیشتر از $\gamma$ حل می‌شوند.

فولادهای HSLA برخلاف فولادهای آب داده و بازپخت شده (بخش ۱۱-۵) قابل جوشکاری‌اند و خواص مکانیکی آنها بدون عملیات گرمایی بعدی حفظ می‌شود. در نتیجه برای مهندسان طراح ماشینها، سازه‌های اصلی، و لوله‌های فشاری بسیار جالب‌اند.

**مثال ۱۱-۳-۱** بااستفاده از اطلاعات شکل ۱۱-۳-۳، دمای لازم برای رسیدن به‌بیشینهٔ سختی این آلیاژ آلومینیم را در ۱۰۰۰۰ ساعت (حدود ۱۴ ماه) برآورد کنید.

حل: بافرض اینکه رابطهٔ آرنیوس (رابطهٔ ۱۰-۱-۱) برقرار باشد، دو دمای $۱۵۰°C$ ($۴۲۳K$) و $۲۶۰°C$ ($۵۳۳K$) را درنظربگیرید. در $۱۵۰°C$ که بیشینهٔ‌سختی

پس‌از ۳۰ ساعت به‌دست می‌آید

$$\ln t_{۱۵۰}=\ln ۳۰=C+\frac{B}{۴۲۳}=۳٫۴$$

در ۲۶۰°C که بیشینهٔ سختی بعداز ۳ دقیقه (یا ۰٫۰۵ ساعت) به‌دست می‌آید

$$\ln t_{۲۶۰}=\ln ۰٫۰۵=C+\frac{B}{۵۳۳}=-۳٫۰$$

ازحل دومعادله

$$C=-۲۷٫۶,\qquad B=۱۳۱۰۰\,\mathrm{K}$$

$$\ln ۱۰^{۴}\,\mathrm{hr}=۹٫۲۱=-۲۷٫۶+\frac{۱۳۱۰۰}{T}$$

$$T=۳۵۶\,\mathrm{K}=۸۳^{\circ}\mathrm{C}$$

توضیح. رابطهٔ آرنیوس را می‌توان در ۲۳۰°C (۵۰۳ K) و ۱۹۰°C (۴۶۳ K) نیز بررسی کرد

$$\ln t_{۲۳۰}=-۲۷٫۶+\frac{۱۳۱۰۰}{۵۰۳}=-۱٫۵۶,\ t=۰٫۲\,\mathrm{hr}$$

$$\ln t_{۱۹۰}=-۲۷٫۶+\frac{۱۳۱۰۰}{۴۶۳}=۰٫۶۹,\ t=۲\,\mathrm{hr}$$

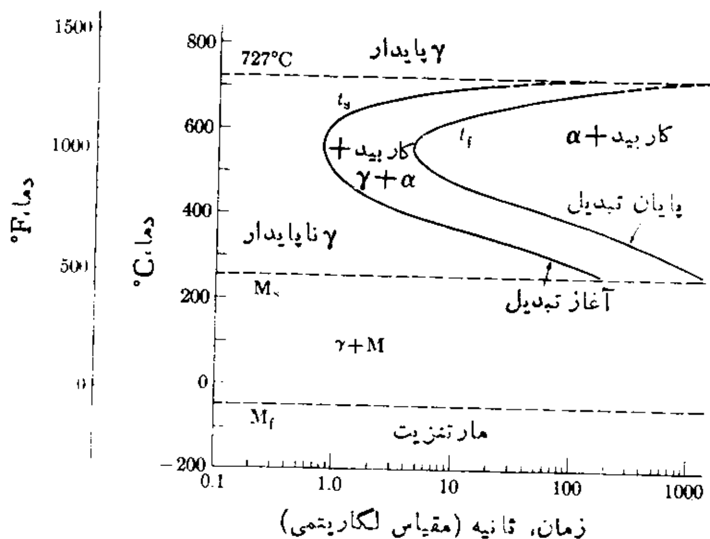
این نتایج با داده‌های تجربی شکل ۱۱-۳-۳ دقیقاً مطابقت ندارد. ولی معقول است، باوجود این برون‌یابی در زمانهای طولانیتر و با دمای کمترهم تقریبی است. ▲

## ۱۱-۴ سرعت واکنش $\gamma\longrightarrow(\alpha+\bar{C})$

**تبدیل همدما.** زمان لازم برای تجزیهٔ استنیت به‌دلیل اهمیت عملی آن به‌تفصیل مطالعه شده است. شکل ۱۱-۴-۱ داده‌های زمان‌ـدما را برای این واکنش در فولاد اوتکتویید (AISI-SAE ۱۰۸۰) نشان می‌دهد. منحنی سمت چپ $t_s$ زمان لازم برای شروع تجزیه است و منحنی سمت راست $t_f$ زمان لازم برای تکمیل واکنش $(\alpha+\bar{C})\longrightarrow\gamma$ را نشان می‌دهد. این منحنیها نمودار تبدیل همدما یا نمودار I-T نامیده می‌شوند.* داده‌های لازم

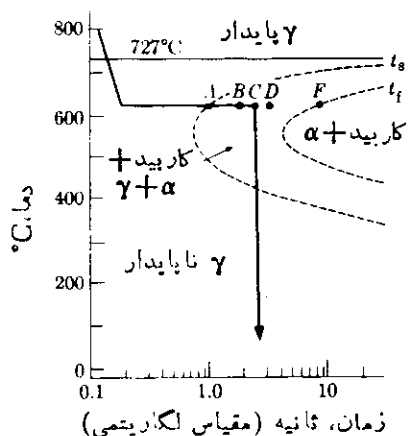
---

* این منحنیها، «منحنی C» (به‌دلیل شکل خاص آن) و به منحنی T—T—T (دما‌ـزمان تبدیل) نیز موسوم‌اند.

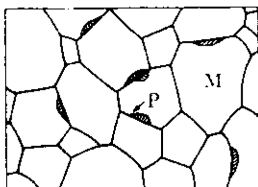



**شکل ۱۱-۴-۱** منحنیهای‌تبدیل همدما برای تجزیهٔ استنیت (SAE ۱۰۸۰).

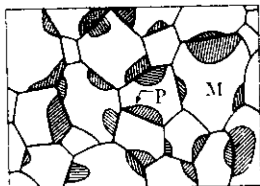
برای شکل ۱۱-۴-۱ به‌ترتیب زیر به‌دست‌آمده است. نمونه‌های کوچك فولاد اوتکتوییذ در گسترهٔ استنیت به‌مدت کافی چنان گرم شده‌اند که به‌طور کامل تبدیل به‌استنیت شوند. این نمونه‌های سیم‌مانند سپس تا دمای کمتری (مثلا $۶۲۰^\circ C$) آب داده شده و نمونه‌ها را مدتهای متفاوتی در این‌دما نگه می‌دارند و سپس‌آنها را به‌دمای اتاق آب می‌دهند. (شکل ۱۱-۴-۲). در نمونه‌هایی که‌کمتر از یك‌ثانیه در $۶۲۰^\circ C$ نگه‌داشته شده بودند تغییر $\gamma \to (\alpha + \bar{C})$ دیده نشد، و تبدیل کامل به α+کاربید نیز تا ده‌ثانیه بعد به‌وقوع نپیوسته بود (شکلهای ۱۱-۴-۳ تا ۱۱-۴-۵). نظیر این‌داده‌ها در دماهای دیگر نیز به‌دست‌آمد




**شکل ۱۱-۴-۲** آب‌دادن منقطع (فولاد اوتکتوییذ). این روش برای به‌دست‌آوردن منحنیهای تبدیل همدما به‌کار می‌رود. آب دادن‌اولیه درحمام داغ‌صورت می‌گیرد، سپس قبل‌از آب‌دادن تا دمای اتاق، فلز را مدتی در آن نگه می‌دارند.




**شکل ۱۱-۴-۳** شروع تبدیل همدما در $620\ ^\circ C$ $(1150\ ^\circ F)$ (کاربید$+\alpha\rightarrow\gamma$). پس‌از ۱ ثانیه (نقطهٔ $A$ شکل ۱۱ـ۴ـ۲) تغییر یافتن به‌پرلیت، P، آغازشده است. M فلزی است‌که به $\alpha+$ کاربید تبدیل نشده است.




**شکل ۱۱-۴-۴** تکمیل ۲۵٪ تبدیل در $620°C$ $(1150°F)$. (نقطهٔ $B$ در شکل ۱۱ـ۴ـ۲.)




**شکل ۱۱-۴-۵** تکمیل ۷۵٪ تبدیل در $620°C$$(1150°F)$. (نقطهٔ $D$ درشکل ۱۱ـ۴ـ۲.)

و با استفاده از آنها نمودار کاملی مانند شکل ۱۱ـ۴ـ۱ رسم شده است.

نمودار I-T نشان می‌دهد که تبدیل استنیت چه در دماهای کم و چه در دماهای بالا (نزدیك به اوتکتویید) به‌آهستگی انجام می‌شود. در دماهای بالاتر تبدیل آهسته است زیرا فوق‌سرمایش به‌حدی نیست‌که جوانه‌های فریت و کاربید به‌آسانی از استنیت قبلی تشکیل شوند. در دمای پایینتر تجزیهٔ استنیت آهسته است زیرا سرعت نفوذکم است و بنابراین جدا شدن کربن از فریت و تبدیل آن به‌کاربید به‌آهستگی صورت می‌گیرد. در دماهای متوسط، جوانه‌زنی به‌حدکافی سریع است و مهاجرت اتمی به‌اندازه‌ای تند است‌که باعث می‌شود واکنش با سرعت شروع و تکمیل شود.

این منحنیها را می‌توان با منحنی رسوب همدما در شکل ۱۰ـ۱ـ۷ مقایسه‌کرد، که تك منحنی بود، زیرا فقط نقطهٔوسط واکنش نشان داده‌شده بود. می‌توانستیم منحنی دیگری برای۵۰٪ تبدیل‌درشکل ۱۱ـ۴ـ۱ رسم‌کنیم که وسط‌منحنیهای $t_s$ و $t_f$ قرار می‌گرفت.*

---

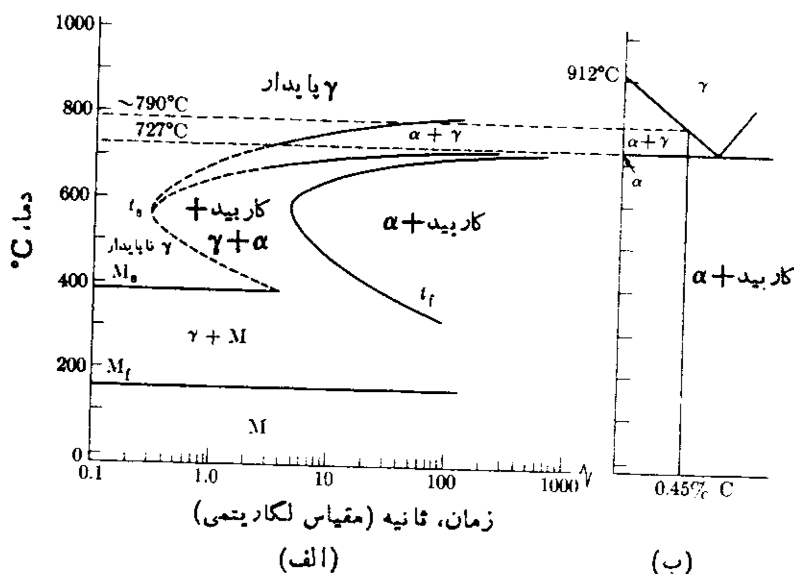
* درون‌یابی آن خطی‌نیست. واکنش یك‌چهارم آن (۲۵٪ و ۷۵٪) نزدیك به‌نقطهٔ ۵۰٪ است زیرا منحنیهای واکنش هلالی شکل‌اند. (شکلهای ۱۰ـ۱ـ۲ و ۱۰ـ۱ـ۴ را ببینید). پس نقاط $B$ و $D$ شکل ۱۱ـ۴ـ۲ که در شکلهای ۱۱ـ۴ـ۴ و ۱۱ـ۴ـ۵ دیده می‌شوند به $C$ نزدیکترند تا به $t_s$ و $t_f$.

باسردکردن فوق‌العاده سریع (آب‌دادن شدید)، غالباً امکان ردنشدن از «زانویی» منحنی‌که آغاز تبدیل را نشان می‌دهد وجود دارد، که دراین صورت بدون تشکیل فریت و کاربیدفولاد تادمای اتاق سردمی‌شود، زیرا تجزیه به‌سمت مارتنزیت (شکل ۱۰-۱-۷) منحرف شده است. در حقیقت منظور از آب‌دادن فولاد درعملیات گرمایی معمول، همین است.

مثالی‌که بررسی شد تبدیل فولاداوتکتویید است به‌شرط آنکه قبل‌از تشکیل پرلیت $\alpha+\bar{C}$ فریت (یا سمانتیت) از استنیت جدا نشود. شکل ۱۱-۴-۶ (الف) نمودار تبدیل مشابهی را برای فولاد SAE ۱۰۴۵ نشان می‌دهد. که از دوجنبه باشکل (۱۱-۴-۱) فرق دارد:

۱. بالای‌دمای اوتکتوییدمقداری فریت از استنیت جدا می‌شودکه باتوجه به‌نمودار فازی‌که در طرف راست شکل ۱۱-۴-۶ رسم شده قابل‌پیش‌بینی است.

۲. تبدیل همدمای فولادی با ۴۵ر۰ کسربن قدری سریعتراز تبدیل فولاد اوتکتویید انجام می‌گیرد. مقایسهٔ «زانوییهای» دومنحنی این تفاوت را نشان می‌دهد: در فولادی که کربن بیشتر دارد تبدیل تقریباً در ظرف یك ثانیه شروع مـی‌شود؛ ولی درفولاد ۴۵ر۰٪ کربن واکنش زودتر آغـاز مـی‌شود. در واقع درحالت اخیر واکنش چنان سریع اتفاق




**شکل ۱۱-۴-۶** نمودار تبدیل‌همدما برای‌فولاد SAE ۱۰۴۵. فازهای پایدار نمودار تعادلی (سمت راست) بلافاصله تشکیل نمی‌شوند،گرچـه واکنش‌تجزیه استنهت در این فولاد سریعتراز فولاد اوتکتویید است (شکل ۱۱-۴-۱).

می‌افتد که سرعت آن را درزانویی منحنی نمی‌توان با روشی که قبلا ذکر شد (آب‌دادن منقطع) اندازه گرفت. هرچه درصد کربن فولاد کمتر باشد واکنش سریعتر خواهد بود، زیرا قسمتی از تأخیر در تبدیل به‌موجب حرکت اتمهای کربن به‌وجود می‌آید.

منحنیهای تبدیل همدما آغاز و پایان واکنش را برحسب متغیر زمان نشان می‌دهند. بنابراین مثل نمودارهایی که درفصل ۹ دیدیم نمودار تعادلی نیستند. گرچه با نمودارهای تعادلی یك‌مورد اشتراك دارند. منحنی منتهی‌الیه سمت راست نمودار I-T دوره‌های زمانی طولانی را نشان می‌دهند. بنابراین فازهایی که موجودند باید با فازهایی که نمودار فازی یا تعادلی نشان می‌دهد، جور باشند. مثلا فازی که طبق نمودار I-T در مورد فولاد ۱۰۴۵ [شکل ۱۱-۴-۶ (الف)] به‌وجود می‌آید همان است که درمورد فولاد ۴۵ر۰٪ کربن در نمودار $Fe-Fe_3C$ [شکل ۱۱-۴-۶ (ب)] دیده می‌شود.

همچنین ببینید که نمودار I-T برای مادهٔ بخصوص و واکنش‌ویژه‌ای است. بنابراین وقتی $\alpha+\bar{C}$ از استنیت تشکیل می‌شود، نمودار I-T دیگر کاربردی ندارد. این امر را می‌توان بـا واکنش $\gamma\rightarrow\alpha+\bar{C}$ برای فـولاد ۱۰۸۰ (شکل ۱۱-۴-۱) نشان داد. اگر استنیت تا $550°C$ آب داده‌شده و به‌مدت ۱۰ ثانیه در این‌دما بماند واکنش کامل است. حالا اگر دما را تا $300°C$ کم کنیم نباید انتظار داشته بـاشیم کـه منحنیهای رسم شده درشکل ۱۱-۴-۱، بـازهم مورد استفاده باشند. خصوصاً $\alpha+\bar{C}$ نمی‌تواند در $300°C$ به‌فاز $\gamma$ برگردد. این خلاف نمودار فـازی خواهد بـود. تنها راه به‌دست‌آوردن دوبـارهٔ استنیت بالابردن دما تا ناحیهٔ استنیت شکل ۹-۷-۳ است.

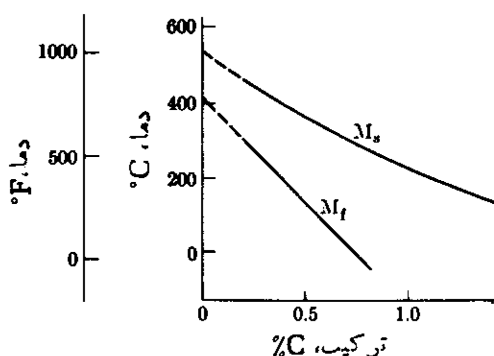
**دمای مارتنزیت.** قسمت پایین شکلهای ۱۱-۴-۱ و ۱۱-۴-۶ دماهایی که درآن‌واکنش مارتنزیت (رابطهٔ ۱۰-۱-۷) شروع می‌شود، $M_s$، و دماهای پایان واکنش، $M_f$، رانشان می‌دهد. و این درصورتی است کـه آب‌دادن فولاد به‌قدری سریع صورت گیرد کـه بدون قطع کردن «زانویی» منحنی C ازآن رد شود. ازآنجا کـه در تبدیل استنیت به‌مارتنزیت نفوذ دخالتی ندارد،* عمل تشکیل مارتنزیت به‌زمان بستگی ندارد. با این‌حال $M_s$ و $M_f$ به‌مقدار کربن موجود بستگی‌دارند (شکل ۱۱-۴-۷) درنتیجه آب‌دادن درآب، درمورد آلیاژهای پرکربن، مثل آنهایی کـه برای فولادهـای ابزار استفاده مـی‌شوند، واکنش $\gamma\rightarrow M$ را کامل نمی‌کند. درنتیجه، این آلیاژها استنیت باقیمانده دارند.

**تأخیر در تبدیل استنیت.** از بحث قبلی نتیجه می‌شود که دما مشخصاً روی تجزیهٔ همدمای استنیت$\gamma$ به‌فریت‌وکاربید $(\alpha+\bar{C})$ مؤثر است. زمان واکنش غیراز دما به‌عوامل دیگری نیز بستگی دارد ازجمله (۱) اندازهٔ دانهٔ استنیت و (۲) تأخیر آلیاژی.

مطابق با شکلهای ۱۱-۴-۳ تـا ۱۱-۴-۵، تشکیل فریت و کاربید از استنیت در مرز دانه‌ها شروع می‌شود. در فولاد ریزدانه مساحت مرزدانه در واحدحجم، که تجزیه از

---

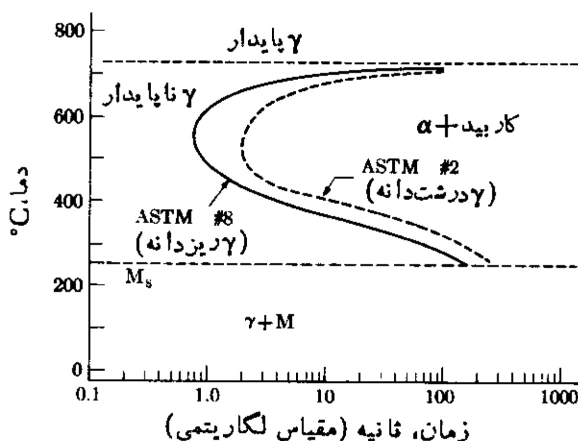
* استنیت با برش به‌مارتنزیت تبدیل می‌شود (بخش ۱۰-۱).




**شکل ۱۱-۴-۷** دماهای تبدیل‌مارتنزیتی (فولادهای‌سادهٔ کربنی) تبدیل در $M_s$ شروع و در $M_f$ کامل می‌شود. بین $M_s$ و $M_f$ استنیت باقیمانده وجود دارد و این به‌دلیل تنشهای ایجاد شده است.

راه جوانه‌زنی می‌تواند برروی آن انجام شود، بیشتر از فولاد درشت‌دانه است. در شکل ۱۱-۴-۸ دومنحنی برای فولاد ریزدانه (عدد اندازهٔ دانه = ۸) و فولاد درشت‌دانه (عدد اندازهٔ دانه = ۲) رسم شده است. تقریباً در هردمایی زمان شروع تبدیل در فولاد درشت دانه سه‌برابر بیشتر است.

اثر تأخیر آلیاژی نیز به‌همان‌اندازه قابل توجه است. مثلا تنهـا ۲۵ر۰٪ مولیبدن

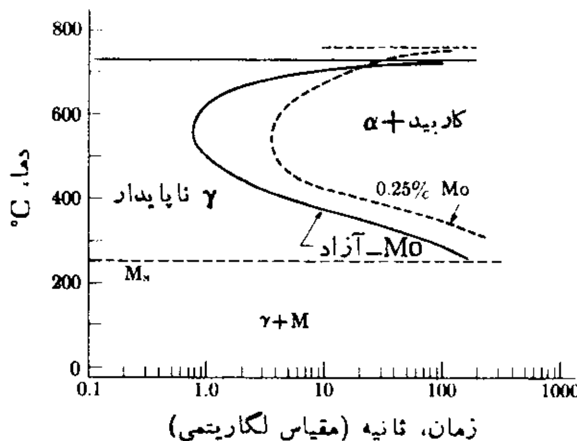



**شکل ۱۱-۴-۸** جوانه‌زنی‌درمرزدانه (فولاداوتکتوئید). برای‌فولادهای اوتکتوئید، اثر انـدازه دانه‌هـای استنیت روی شروع تجزیهٔ آن نشان داده‌شده‌است. در فولادی‌که دانه‌های استنیت ریزی دارد، سطح‌مرزدانه‌ها، که واکنش $\gamma \rightarrow \alpha + \bar{C}$ ازآنجا شروع می‌شود، بیشتراست.

(شکل ۱۱-۲-۹) شروع تبدیل همدما را با یك فاکتور چهار در دماهای کمتر از ۶۵۰°C (۱۲۰۰°F) به‌تأخیرمی‌اندازد. دلیل تأخیر آن است که‌هنگام تجزیهٔ استنیت علاوه‌بر کربن، اتمهای مولیبدن نیز باید جابه‌جا شوند. بیشتر Mo واردکاربید می‌شود. اگر عنصر آلیاژی سیلیسیم باشد، بیشتر آن به‌درون فریت خواهدرفت. ازآنجاکه تقریباً تمام عناصر آلیاژی مانند Cr، Ni، Si، Mn، Mo، Ti، W و... کندتـر از کربن در آهن نفوذ مـی‌کنند (شکل ۴-۷-۳) منحنیهای تبدیل همدما برای تمام فولادهای کم آلیاژ (جدول ۹-۹-۱) به‌طرف راست تغییر مکان‌می‌دهند. در واقع به‌راحتی‌می‌توان بسیاری ازفولادهای کم‌آلیاژ را، بی‌آنکه «زانویی» منحنی را قطع کنند، تا دمای اتاق‌سردکرد به‌طوری‌که تمام ساختار به‌مارتنزیت تبدیل شود.

**تبدیل با سردکردن مداوم (CCT).** بااستفاده از نمودار تبدیل همدما به‌راحتی می‌توان اثر دمای ثابت را روی تجزیه استنیت بررسی کرد. ولی‌درعمل بیشتر باسرد کردن مداوم برخورد می‌کنیم: (۱) قطعه‌ای فولاد داغ از کوره خارج و در هوا سرد می‌شود یـا (۲) فولاد درآب‌سرد می‌شود. درهیچیك از این‌حالات برای تشکیل $(\alpha+\bar{C})$ قطعه در دمای ثابت نگه‌داشته نشده است.

حال تجزیهٔ استنیت با سردکردن مـداوم در سرعتهای مختلف را درنظر می‌گیریم. آب‌دادن کامل موجب‌می‌شود «زانویی» منحنی تبدیل قطع‌نشود و در نتیجه استنیت به‌جای تبدیل به‌پرلیت (یعنی $\alpha+\bar{C}$) به‌مارتنزیت تبدیل‌می‌شود. سردکردن آهسته تشکیل پرلیت را میسر می‌سازد ولی در مقایسه با تبدیل همدما، واکنش پس‌از زمان طولانیتر (وبنابراین در دمای‌کمتری) شروع می‌شود، زیرا قسمتی از زمان در دماهای‌بالاتر که سرعت شروع

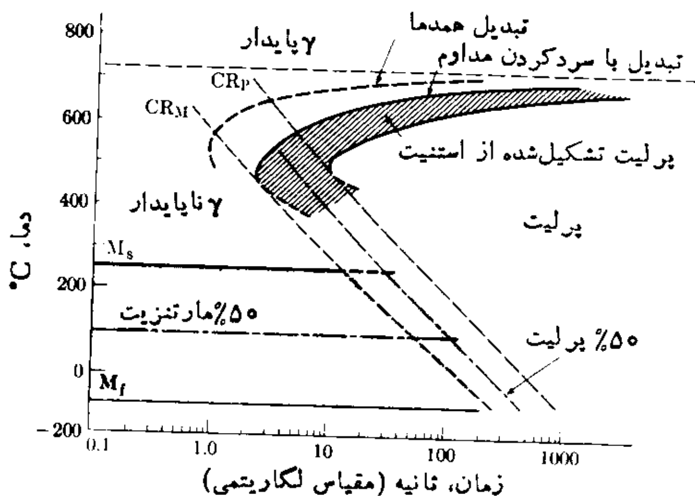



**شکل ۱۱-۴-۹** تأخیر در تبدیل. مولیبدن، مانند سایر عناصرآلیاژی، شروع تبدیل استنیتی را به‌تأخیر می‌اندازد.

واکنش کند بوده سپری شده است. بدین‌ترتیب برای تبدیل با سردکردن مداوم، منحنیهای تبدیل همدما به‌طرف راست و پایین تغییرمکان می‌دهند (شکل ۱۱ـ۴ـ۱۰).

در تجزیهٔ استنیت باسردکردن مداوم دو سرعت سردکردن بحرانی وجود دارد که در شکل ۱۱ـ۴ـ۱۰ نشان داده شده است. یکی ازآنها سرعت سردکردن $CR_M$ است که درست‌ازکنار«زانویی» منحنی‌رد می‌شود، و اگر سرعت‌سردکردن کمی بیشتر به‌طرف چپ منحنی، یعنی سریعتر باشد، فقط مارتنزیت حاصل خواهدشد. دومین سرعت سردکردن $CR_P$ است که مارتنزیت تولید نمی‌کند و اگر سرعت سردکردن‌کمی بیشتر به‌طرف راست آن یعنی آهسته‌تر باشد فقط پرلیت به‌وجود خواهد آمد. برای فولاد اوتکتویید ($Fe$ ۹۹ر۲–۸ر۰$C$) این دوسرعت بحرانی سردکردن از $700°C$ ($1300°F$) که در گسترهٔ دمای اوتکتویید است، به‌ترتیب حدود $140°C/sec$ و $35°C/sec$ هستند. اگر فولاد عناصر آلیاژی داشته باشد هر دوسرعت آهسته‌تر خواهد بود، زیرا وجود چنین عناصری، تبدیل $\gamma \rightarrow (\alpha+\bar{C})$ را به‌تأخیر می‌اندازد (شکل ۱۱ـ۴ـ۹).

**مثال ۱۱-۴-۱** سه‌سیم فولادی AISI–SAE ۱۰۴۵ در مراحل نشان داده شده، تحت عملیات گرمایی زیر قرار می‌گیرند. فازهای موجود و ترکیب شیمیایی تقریبی پس‌از هر




**شکل۱۱-۴-۱۰** تبدیل با سردکردن مداوم (فولاد اوتکتویید). برای یك فولاد معین زمان و دمای شروع نسبت به‌منحنی تبدیل همدما جابه‌جا می‌شوند (به‌شکل ۱۱ـ۴ـ۱ رجوع‌کنید). $CR_M$ کمینه سرعت سردکردن برای ۱۰۰٪ مارتنزیت و $CR_P$ بیشینهٔ سرعت سردکردن برای ۱۰۰٪ پرلیت است.

مرحله را بیان کنید: (علامت # نشان می‌دهد که سیم در آن دما نگه داشته شده تا تعادل برقرار شود.)

| | | زمان نگهداشتن |
|---|---|---|
| سیم (الف): | ۱. تا $820^\circ C$ گرم شده است: | # |
| | ۲. تا $560^\circ C$ آب داده شده است: | ۰ |
| | ۳. در $560^\circ C$ نگه داشته شده است: | ۱ دقیقه |
| | ۴. دوباره تا $820^\circ C$ گرم شده است: | # |
| سیم (ب): | ۱و۲. مانند سیم (الف) (۱) و (۲): | # |
| | ۳. در $560^\circ C$ نگه‌داشته شده است: | ۱ ثانیه |
| | ۴. تا $430^\circ C$ آب داده شده است: | ۰ |
| سیم (ج): | ۱. تا $730^\circ C$ گرم شده است: | # |
| | ۲. تا $430^\circ C$ آب داده شده است: | ۰ |
| | ۳. تا $330^\circ C$ آب داده شده است: | ۱۰ ثانیه |
| | ۴. به‌مدت طولانیتری در $330^\circ C$ نگه‌داشته شده است: | # |

حل و توضیح.

سیم (الف)

۱. $\gamma$ (۴۵ر۰C–۵۵ر۹۹Fe)

۲. همان $\gamma$ ولی استنیت، شبه‌پایدار است، (شکل ۱۱–۴–۶).

۳. $\alpha$ مقدار قابل‌اغماضی کربن؛ $\bar{C}$۷ر۶٪ کربن.

۴. $\gamma$ مثل (۱)

سیم (ب)

۳. $\gamma$ (۴۵ر۰٪ کربن)+[$\alpha$(مقدار قابل اغماضی کربن)+$\bar{C}$(۷ر۶٪ کربن)]

۴. مانند (۳) زیرا ($\alpha+\bar{C}$) پایینتر از دمای اوتکتوید به استنیت تبدیل نمی‌شود.

سیم (ج)

۱. $\alpha$ (۰۲ر۰٪ کربن)+$\gamma$ (۸ر۰٪ کربن)، به‌نمودار فازی مراجعه کنید.

۲. توجه کنید که با سردشدن، انتظار تغییر $\alpha$ نمی‌رود. استنیت ترکیب اوتکتویید دارد، بنابراین باید برای تبدیل آن به‌شکل ۱۱–۴–۱ مراجعه کنیم. در زمان صفر، $\gamma$ به‌صورت ناپایدار وجود دارد.

۳. همان $\alpha$ (C ۰۲ر۰٪) و $\gamma$ ناپایدار (C۸ر۰٪)

۴. $\alpha+\bar{C}$ (۷ر۶٪ کربن).

▲

**مثال ۱۱-۴-۲** نمونهٔ ۱ گرمـی نازك ($<0.5mm$) فولاد ۱۰۴۵ در هنگـام فـرایند عملیات گرمایی مراحل زیر را طی می‌کند. (علامت # به‌معنی آن است که‌تعادل به‌دست آمده است.)

| | زمان نگهداشتن |
|---|---|
| ۱. تا دمای $730°C$ گرم شده است: | # |
| ۲. تا $550°C$ آب داده شده است: | ۱۰ ثانیه |
| ۳. تا $100°C$ آب داده شده است: | ۰ ثانیه |

بعداز هرمرحله چه‌فازهایی وجود دارد؟ مقدار کربن آنها چقدر است؟ تقریباً چه‌مقدار از هرفاز موجود است؟

حل و توضیح.

۱) $0.56\ g\gamma(\%0.8C)$ و $0.44\ g\ \alpha(\%0.02C)$

حالا مخلوطی از $\alpha$ و $\gamma$ داریم. با آب‌دادن تغییری در فریت به‌وجود نمی‌آید (بجز آنکه سردتر مـی‌شود). استنیت فولاد ۱۰۸۰ در مقیاس میکروسکوپـی است. بنابراین باید از نمودار I-T مربوط به‌۱۰۸۰ (شکل ۱۱-۴-۱) استفاده کنیم، نه‌ازنمودار ۱۰۴۵ (شکل ۱۱-۴-۶).

۲) $0.44\ g\alpha(0.02\%C)$

$0.56\ \bar{g}\ \gamma \rightarrow 0.5\ g\alpha(\%0.02)$, و $0.06\ g\ \bar{C}\ (\%6.7C)$

کل $\alpha = 0.94\ g\alpha$

حالا ازشکل ۱۱-۴-۱ استفاده می‌کنیم زیرا تجزیهٔ $\gamma$ کامل شده است.

۳) $0.06\ g\ \bar{C}\ (\%6.7C)$, و $0.94\ g\ \alpha\ (\%0.02C)$

آب دادن تا $100°C$ اجازه نمی‌دهدکه اندك کربن بـاقیمانده ($0.02\%$) از فریت جدا شود.
▲

☐ **مثال ۱۱-۴-۳** برای آنکه شروع تبدیل شکل ۱۱-۴-۸ از منحنی سمت‌چپ (عـدد اندازهٔ دانه ۸) به‌منحنی‌سمت‌راست (عدد اندازهٔ دانه۲) منتقل‌شود، اندازهٔ دانه باچه‌نسبتی باید تغییرکند؟ محاسبه را برای سطح مرزدانه‌ها نیز انجام دهید.

حل: باتوجه به‌رابطهٔ ۴-۳-۲، در بزرگنمایی ۱۰۰ $\times$ و اندازهٔ دانهٔ ۸# داریم

$$N = ۲^{۸-۱} = \frac{۱۲۸}{۰٫۰۶۴۵\ mm^۲}$$

با ۱۰۰× و اندازهٔ دانهٔ# ۲

$$N = ۲^{۲-۱} = \frac{۲}{۰٫۰۶۴۵ mm^۲}$$

$$\frac{N_۸}{N_۲} = \frac{۱۲۸}{۲} = ۶۴$$

اگر $\delta$ یکی از ابعاد خطی‌دانه را نشان دهد که باعکس ریشهٔعدد دانه تغییر می کند، داریم

$$\frac{\delta_۲}{\delta_۸} = \sqrt{\frac{N_۸}{N_۲}} = \sqrt{۶۴} = ۸$$

برای سطح مرزدانه‌ها، دانه‌ها را کروی یامکعبی فرض می‌کنیم، که در آن

$$\frac{۳}{\delta} = \text{مساحت مرزدانه (به‌توضیحات توجه‌کنید)}$$

بنابراین

$$\frac{B_۲}{B_۸} = \frac{۳/\delta_۲}{۳/\delta_۸} = \frac{۱}{۸}$$

توضیح. نسبت سطح جانبی به‌حجم برای مکعب $۶a^۲/a^۳ = ۶/a$ و برای کره $۴\pi r^۲/(۴/۳)\pi r^۳ = ۶/d$ است. مساحت مرزدانه به‌حجم برابر با $۳/\delta$ است، زیرا هرمرز، بین دودانهٔ مجاور، مشترک‌است. البته دانه‌ها نه‌کروی‌اند و نه مکعبی ولی می‌توان چیزی بین این‌دو درنظر گرفت؛ بنابراین نسبت $B/V$ همان $۳/\delta$ باقی می‌ماند. ▲

## ۱۱-۵ فرایندهای عملیات فولاد تجارتی

از آنجاکه استنیت به‌راههای مختلفی تجزیه می‌شود می‌توان یکی ازمیکروساختارهای مختلف را برگزید، این میکروساختارها درجدول ۱۱-۵-۱ و شکل ۱۱-۵-۱ خلاصه شده‌اند. خواص حاصل نیز به‌طور قابل‌توجهی تغییر می کنند.

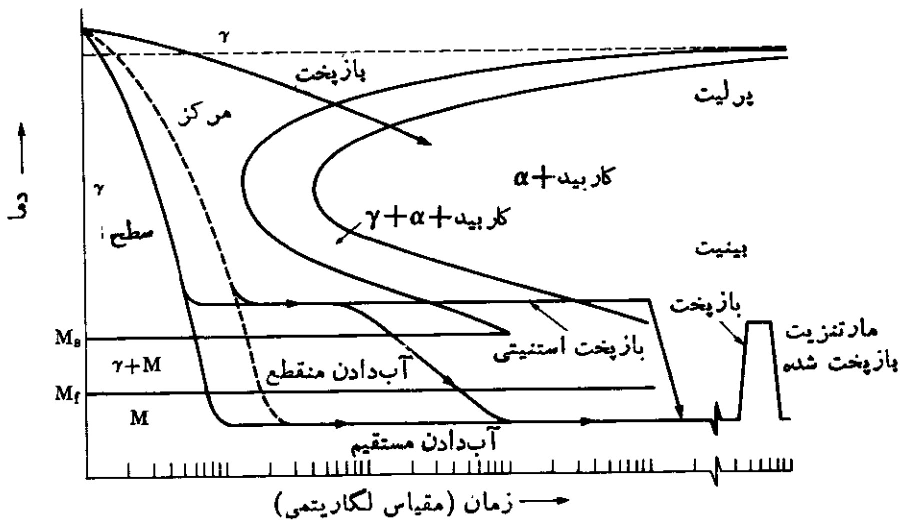
**تابکاری.** تابکاری‌قبلادربخش ۱۱-۱ موردبحث‌قرار گرفته‌است (همچنین شکل ۱۱-۲-۲ (الف) را ببینید). خواص حاصل در شکلهای ۱۰-۳-۳ و ۱۰-۳-۴ برای فولادهای ساده دیده می‌شوند.

**جدول ۱۱-۵-۱ فرایندهای تبدیل در فولاد***

| فرایند | هدف | طرز عمل | فاز(های) حاصل |
|---|---|---|---|
| تابکاری | نرم کردن | سرد کردن آهسته از گسترهٔ $\gamma$ پایدار | $\alpha$ + کاربید |
| آب‌دادن | سخت کردن | آب‌دادن باسرعتی بیشتر از $CR_M$ | مارتنزیت** |
| آب‌دادن منقطع | سخت کردن بدون ترک‌خوردگی | آب‌دادن و سپس سرد کردن آهسته از $M_s$ تا $M_f$ | مارتنزیت** |
| بازپخت استنیتی | سخت کردن بدون تشکیل مارتنزیت شکننده | آب‌دادن و سپس تبدیل همدما بالاتر از $M_s$ | $\alpha$ + کاربید |
| بازپخت | چقرمه کردن (معمولا با کمترین میزان نرم شدن) | دوباره گرم کردن مارتنزیت | $\alpha$ + کاربید |

* به‌شکل ۱۱-۵-۱ رجوع کنید.

** فولادهای حاوی مارتنزیت باید با فرایند بازپخت استنیتی چقرمه شوند.




**شکل ۱۱-۵-۱** فرایندهای تبدیل. **تابکاری:** تبدیل عادی کاربید+α→γ انجام می‌شود. **آب‌دادن مستقیم:** ابتدا در سطح وسپس درمرکز مارتنزیت تشکیل شده و درقطعه تنش زیادی ایجاد می‌شود. **آب‌دادن منقطع:** چون زمان کافی وجود دارد سطح و مرکز نمونه همزمان تبدیل می‌شوند، و از تنش و ترک‌خوردگی ناشی از آب‌دادن جلوگیری می‌شود. **بازپخت:** برای کامل شدن تبدیل، پس‌از آب‌دادن مستقیم و منقطع، عمل بازپخت لازم است، **بازپخت استنیتی:** **آب‌دادن مانع تشکیل پرلیت می‌شود اما بالای $M_s$ هنوز تبدیل کاربید+α→γ انجام می‌شود.** میکروساختار حاصل بینیت است.

**آب‌دادن.** هرگاه‌سرعت سردکردن سریعتر از $CR_M$ درشکل ۱۱-۴-۱۰ باشد $(\alpha+\bar{C})$ تشکیل نشده و مارتنزیت سخت (و نسبتاً شکننده) حاصل می‌شود. هدف ازآب دادن فولادها نیز همین است.

چگالی استنیت از مارتنزیت (و همچنین ازفریت به‌علاوهٔ کاربید) بیشتر است واین در هنگام آب‌دادن مستقیم استنیت به‌مارتنزیت اشکال ایجاد می‌کند، زیرا پس‌از آنکه سطح قطعه سرد و به‌مارتنزیت ترد تبدیل شد مرکز آن سرد شده و هنگام تبدیل انبساط می‌یابد. در این‌حال اگر ابعاد فولاد بزرگتر از ابعاد ورق یا سیم باشد وبخصوص اگر درصد کربن بیش‌از ۵ر۰٪ باشد، احتمال ترک‌خوردن وجود دارد. این یکی‌دیگر از دلایل افزایش‌عناصر آلیاژی به‌فولاداست، درفولاد آلیاژی‌زمان بیشتری برای تشکیل مارتنزیت وجود دارد (شکل ۱۱-۴-۹)، پس فولاد آلیاژی را می‌توان آهسته‌تر سردکرد تا تغییر دما بین سطح و مرکز کمتر شده و زمان تبدیل آنها به‌هم نزدیکتر شود. به‌این ترتیب

می‌توان از تغییر حجم شدید و تنشهای حاصل که موجب ترک‌خوردگی می‌شود، جلوگیری کرد.

**آب‌دادن منقطع.** با بررسی نمودار تبدیل همدما می‌توان دریافت که علاوه بر آب‌دادن مستقیم، به‌روش آب‌دادن منقطع نیز می‌توان عمل کرد (آب‌دادن منقطع ممکن است بازپخت مارتنزیتی یا آب‌دادن مارتنزیتی نیز نامیده شود).

در این روش فولاد را آب داده سریعاً از کنار «زانویی» منحنی تبدیل می‌گذرانند تا از تشکیل $(\alpha+\bar{C})$ جلوگیری شود، اما سردکردن بالای دمای $M_s$ قطع می‌شود. بعد سردکردن را باسرعت کمتری از گسترهٔ مارتنزیت تادمای متعارفی ادامه می‌دهند به‌طوری که سطح فولاد و مرکز آن کم و بیش همزمان سرد و تبدیل شوند و در نتیجه از ایجاد ترک ناشی از آب‌دادن جلوگیری شود. در این دماهای پایین می‌توان سردکردن را بازهم کندتر انجام داد زیرا باکاهش دما تشکیل مارتنزیت مستقیماً صورت می‌گیرد و تشکیل $(\alpha+\bar{C})$ به‌دلیل کندی زیاد به‌تأخیر می‌افتد.

این فرایند از نقطه‌نظر تولیدی پیچیده‌تر است، زیرا پس از آب‌دادن باید سردکردن رامتوقف کرد وبعد باسرعت کمتری ادامه‌داد. درآب‌دادن منقطع نیز مانند آب‌دادن مستقیم، مارتنزیت حاصل می‌شود که باید بازپخت شده چقرمگی لازم درآن ایجاد شود.

**بازپخت.** مهمترین مشخصهٔ مارتنزیت سختی استثنایی آن است. همچنین مارتنزیت وقتی کربن داشته‌باشد به‌علت انعطاف ناپذیری، ترداست واین تردی، قابل انتظاراست زیرا عموماً سختی و انعطاف‌پذیری عکس یکدیگرند. (بامقایسهٔ شکلهای ۱۰ـ۳ـ۳ و ۱۵ـ۳ـ۴ معلوم می‌شود که با افزایش مقدار کربن سختی واستحکام زیاد و چقرمگی و انعطاف‌پذیری کاهش می‌یابد.) خوشبختانه با بازپخت مارتنزیت افزایش چقرمگی، سریعتراز کاهش سختی و استحکام صورت می‌گیرد.*

جدول ۱۱ـ۵ـ۲ نشان می‌دهد که فولاد ۴۱۴۰ هم در شرایط تابکاری شده وهم در شرایط کروی شده چقرمه و انعطاف‌پذیر است ولی استحکام چندان زیادی ندارد ازطرفی مارتنزیت که‌بسیارسخت و اساساً محکم است، فاقد چقرمگی‌است و به‌آسانی ترک می‌خورد.

---

* این امر قرنها پیش به‌وسیلهٔ آزمون و خطا مشخص شده بود ولی اصول آن درطول زندگی متالورژیستهای امروز کشف شده است.

بازپخت مطمئناً یکی از مهمترین کشفهای طبیعت است‌که برپیشرفت تکنولوژیکی بشر اثر گذاشته است. می‌توانیم فولادها را تابکاری کنیم تا قابل ماشینکاری شوند. به‌نوبهٔ خود این فولادها را می‌توان سخت و بازپخت کرد به‌طوری‌که بتوانند سایر فولادها را ماشینکاری کنند. روش تکنولوژیکی مفیدی مثل‌این، برای سایرمواد تا این‌حد بازده ندارد، زیرا توأماً سختی و چقرمگی ندارند. یا نرم شده و کند می‌شوند یا از شدت تردی می‌شکنند.

**جدول ۱۱-۵-۲** آثار عملیات گرمایی (SAE ۲۱۴۰)

| میکروساختار | استحکام کششی MPa | چقرمگی J |
|---|---|---|
| تابکاری‌شده، $(\alpha+\bar{C})$ باکاربید لایه‌ای | ۶۵۵ | ۵۵ |
| ساختار کروی، $(\alpha+\bar{C})$، کاربید«کروی» بزرگ در زمینهٔ فریت | ۴۸۰ | ۱۱۰ |
| مارتنزیت، M | ~۱۴۰۰ | <۳ |
| مارتنزیت بازپخت شده، $(\alpha+\bar{C})$ باکاربید پراکنده در زمینه فریت | | |
| ۱ ساعت در ۵۰۰°C(۹۳۰°F) | ۱۲۷۵ | ۵۵ |
| ۱ ساعت در ۶۰۰°C(۱۱۱۰°F) | ۱۰۳۵ | ۱۱۰ |

دراین‌صورت مارتنزیت بازپخت شده می‌تواند با عملیات گرمایی مناسب استحکام زیاد و چقرمگی مطلوب را داشته باشد، زیرا در این‌صورت ذرات پـراکنده و سخت کاربید در زمینهٔ چقرمه‌ای از فریت جایگزین مـارتنزیت ترد، شده است. (شکل ۱۰-۲-۱). ذرات کاربید مانع حرکت نابجاییها و در نتیجه مانع لغزش می‌شونـد و به‌همان‌ترتیب کـه در رسوب سختی بخش (۳-۱۱) دیدیم، استحکام آلیاژ را بالا می‌برند. در همین‌حال فریت انعطاف‌پذیر در نقاطی‌که تمرکز تنش وجود دارد (شکل ۸-۷-۲) به‌طور موضعی تغییر شکل می‌یابد تا موجب کندشدن نوك ترکهایی شود که درحال ایجاد شدن هستند.*

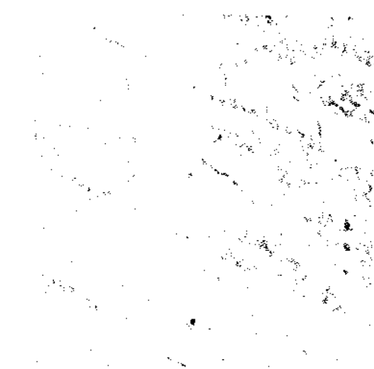
**بازپخت استنیتی** • آخرین فرایند تبدیلی کـه برای تجزیـهٔ استنیت بررسی مـی‌کنیم، بازپخت استنیتی است که درآن استنیت در دمای ثابتی درست بالای دمای $M_s$ به‌فریت و کاربید تبدیل می‌شود. برای این‌کار باید از تشکیل پرلیت در دماهـای بالاترجلوگیری کرد و بنابراین آب‌دادن لازم است. مزیت این روش‌آن است‌کـه تبدیل به‌وسیلهٔ برش و

* متالورژیستها می‌دانندکه گرم‌کردن تا حدود ۵۰۰°C(۹۰۰°F) فولاد را ترد می‌کند زیرا واکنشهای ثانویه‌ای‌وجود دارندکه بین عناصرآلیاژی صورت‌می‌گیرند. بنابراین اگربازپخت در دماهای بالاتر انجام شود، لازم است‌که فولاد از این دما سریعاً سرد شود. همچنین می‌دانند که چقرمگی دمای انتقالی دارد (بخش ۶-۸)، که با اندازهٔ دانه استنیت وسایر عوامل تغییر می‌کند.

نفوذتواماً صورت‌می گیردتا کاربیدهای ریز درفریت پراکنده‌شوند ومجموعه‌ی محکم و چقرمه به‌وجودآید. همچنین از ترك‌خوردگی ناشی ازآب‌دادن نیزجلوگیری‌می‌شود زیرا واکنش (و تغییرحجم) در دمای ثابت انجام می گیرد. از خیلی جهات ساختار حاصل، یعنی بینیت (شکل ۱۱–۵–۲) شبیه به‌مارتنزیت (بازپخت شده) است و خواص مکانیکی آن‌ها بسیار نزدیك است.

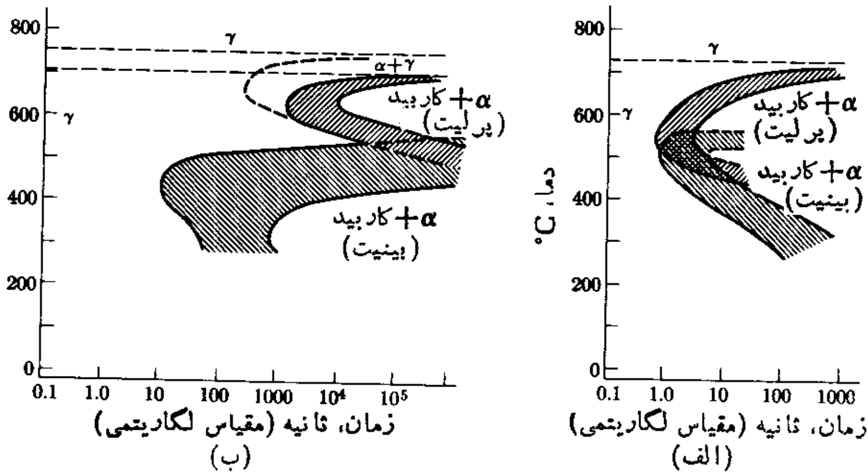
بررسی دقیق فرایندهای تبدیل همدمای $\gamma \to \alpha + \bar{C}$ در مورد فولاد ۱۰۸۰ نشان می‌دهدکه بالا و پایین «زانویی» منحنی I-T این فرایندها تفاوت دارند. بالای این دما جوانه‌زنی به‌مرز دانه‌های استنیت محدود می‌شود ورشد $(\alpha+\bar{C})$ به‌صورت پرلیت در داخل دانه‌های استنیت اولیه ادامه می‌یابد. زیر «زانویی» واکنش [illegible] به کندی صورت می گیرد؛ ولی فلزی که شدیداً فوق سردشده در محلهای بسیاری که در آن عیب‌وجوددارد درداخل‌دانه‌های استنیت C و α جوانه‌زده و بینیت تولید [illegible] منحنی I-T شکل ۱۱–۴–۱ در واقع دومجموعه منحنی است که در شکل ۱۱–۵–۳(الف) دیده می‌شود. درمورد فولاد ۱۰۸۰ به‌طوراتفاقی این‌منحنیها باهم مماس‌اند. در موردفولادهای دیگر، همان‌طورکه شکل ۱۱–۵–۳(ب) برای فولاد ۴۳۴۰ نشان می‌دهد مماس نیستند. بالای تقریباً ۵۵۰°C (برای دو فولاد فوق)، پرلیت در مقایسه با بینیت [illegible] تشکیل می‌شود. پایین آن‌دما، ابتدا بینیت به‌وجود می‌آید. هردو [illegible] ایجاد می‌کنند.

وقتی دومنحنی مماس می‌شوند [شکل ۱۱–۵–۳(الف)] امکان به‌دست آوردن [illegible]



**شکل ۱۱–۵–۲** بینیت با بزرگنمایی ۱۱۰۰۰. این فولاد SAE ۱۰۸۰ استنیتی، و بعد در دمای ثابت ۲۶۰°C تبدیل شده تا زمینه‌ای فریتی با کاربیدهای‌ریز پراکنده درآن‌به‌وجود آید. سختی آن ۵۷Rc است.

* این الگوی دوتایی میکروساختار مختص فولادها نیست. در واقع این‌امر ابتدا در ارتباط بازسوب همدما (شکل ۱۰–۱–۸) مطرح‌شد. بنابراین‌می‌توانیم‌آن منحنی‌را به‌صورت دومنحنی مماس مجدداً رسم‌کنیم. یکی برای واکنش مرزدانه‌ها و دیگری برای رسوب درون دانه‌ها. فرایند پیرسختی $XAB$ (شکل ۱۱–۳–۱) نیز برای استفاده از رسوب درون دانه‌ها طراحی شده است.




**شکل ۱۱-۵-۳** تشکیل پرلیت وبینیت. الف) فولاد اوتکتویید، فولاد ۴۳۴۰. بالای ۵۵۰°C پرلیت زودتر از بینیت تشکیل می‌شود و پایینتر از ۵۵۰°C (۱۰۰۰°F) بینیت در زمان کمتری به‌وجود می‌آید.

باسردکردن مداوم‌وجود ندارد، زیرا همیشه ابتدا پرلیت تشکیل‌می‌شود. ولی فولاد ۴۳۴۰ را می‌توان باسردکردن مداوم به‌بینیت تبدیل‌کرد، زیرا با افزایش عناصر آلیاژی تشکیل پرلیت بیشتراز بینیت به‌تأخیر می‌افتد [شکل ۱۱-۵-۳(ب)].

**مثال ۱۱-۵-۱** الف) قطعهٔ کوچکی از فولاد ۱۰۴۵ تا ۸۵۰°C گرم شده، تا ۶۵۰°C آب‌داده شده، برای ۵ ثانیه دراین دما نگه داشته‌شده، و سپس تا دمای ۲۰°C آب‌داده می‌شود. بعداز هرمرحله چه‌فازهایی حاصل می‌شود؟ ب) قطعهٔ کوچکی از فولاد ۱۰۸۰ تا ۸۰۰°C گرم شده، تا ۱۰۰°C آب داده شده و دوباره تا ۲۹۰°C گرم‌شده و به‌مدت ۱ دقیقه دراین دما نگه داشته شده است. پس‌از هرمرحله چه‌فازهایی به‌وجود می‌آیند؟

حل: الف) در ۸۵۰°C   استنیت ناپایدار

پس‌از ۵ ثانیه در ۶۵۰°C:   استنیت ناپایدار + فریت + کاربید

پس‌از آب‌دادن تا ۲۰°C:   مارتنزیت + فریت + کاربید*

ب) در ۸۰۰°C:   استنیت پایدار

پس‌از آب‌دادن تا ۱۰۰°C:   استنیت ناپایدار + مارتنزیت

پس‌ازیک‌دقیقه در ۲۹۰°C:   استنیت ناپایدار + مارتنزیت*

* واکنشهای رابطهٔ (۱۰-۱-۷) پایینتراز دمای اوتکتویید برگشت‌پذیر نیستند.

توضیح. اگر در ۲۹۰°C زمان کافی داده شود، استنیت ومارتنزیت به فریت + کاربید تبدیل می شوند.
▲

**مثال ۱۱-۵-۲** روی دو میلهٔ مته (به قطر ۴ میلی‌متر) از فولاد ۱۰۸۰ عملیات زیر انجام می‌شود:

| | (۱) | (۲) |
|---|---|---|
| استنیتی شده: | ۷۷۵°C | ۷۷۵°C |
| آب داده شده تا: | ۲۷۵°C | ۲۷۵°C |
| نگه‌داشته‌شده در ۲۷۵°C به‌مدت: | ۴۵ ثانیه | ۴۵دقیقه |
| سرد شده تا ۳۰°C درمدت: | ۳۰ ثانیه | ۳۰ ثانیه |

الف) فاز(های) موجود پس از هرمرحله را مشخص کنید.
ب) حاصل هریك از مراحل چه‌میکروساختاری خواهد داشت؟
ج) هریك ازاین فرایندها چه نام دارند؟

حل:

میلهٔ (۱) الف) استنیت، استنیت ناپایدار، مارتنزیت + ($\gamma$)
ب) مارتنزیت، به‌علاوهٔ استنیت باقیمانده
ج) آب‌دادن منقطع (یا آب‌دادن مارتنزیتی)

میلهٔ (۲) الف) $\gamma$، $\gamma$ ناپایدار، $\alpha+\bar{C}$، $\alpha+\bar{C}$؛
ب) بینیت؛
ج) بازپخت مارتنزیتی

توضیح. سختی مارتنزیت در میلهٔ (۱) $65R_C$ است؛ ولی برای چقرمه‌شدن باید بازپخت شود. محصول نهایی مقداری از این‌سختی را از دست می‌دهد (شکل ۱۰-۳-۹) وقتی در ۲۷۵°C (۵۲۵°F) بینیت تشکیل می‌شود، سختی آن تقریباً $50R_C$ است؛ لازم نیست که این ساختار بازپخت شود، زیرا پراکندگی‌ریزی از کاربید در زمینهٔ فریت وجود دارد.
▲

**مثال ۱۱-۵-۳** روشی برای عملیات گرمایی بازپخت استنیتی فولادهای زیر پیشنهاد کنید: الف) فولاد ۱۰۴۰، ب) فولاد ۴۳۴۰. در مورد مشخصات تولیدی هریك توضیح دهید.

روش:

الف) ازشکل ۱۱-۴-۶ استنیتی شدن در بالای ۸۰۰°C(۱۴۷۵°F)؛ آب‌دادن تا

$425°C$~($800°F$~)؛ نگه‌داشتن به‌مدت تقریباً ۱دقیقه، سرد کردن تا دمای متعارفی.
ب) ازشکل ۱۱-۵-۳ (ب): استینیتی‌شدن‌بالای $750°C$($1380°F$ >)؛ آب‌دادن تا $325°C$~($620°F$~)؛ نگه‌داشتن به‌مدت‌تقریباً ۱ ساعت، سرد کردن تادمای متعارفی.

توضیح. ممکن نیست که فولاد را آنقدر سریع سرد کنیم کـه سرعت آب‌دادن فولاد ۱۰۴۰ از $CR_M$ بیشتر شود، (بجز در مـورد سیم‌پیانو و تیغهای صورت‌تراشی). فـولاد ۴۳۴۰ برای آنکـه منحنی شروع تبدیل را قطع نکند اندکی بیشتر فرصت دارد. از آن مهمتر، بینیت است که چقرمه و نسبتاً سخت است.
فولادهایی که بیشتر از فولاد ۴۳۴۰ عنصر آلیاژی دارند را می‌توان برای مواردی که زمان بیشتری برای آب دادن لازم است به‌کاربرد. ولی برای‌آنکـه در نهایت بینیت تشکیل شود، مدت بیشتری باید در کوره باقی بمانند. ▲

□ **مثال ۱۱-۵-۴** بعداز آب دادن فولاد ۱۰۸۰ هنوز ۵ v/o استنیت وجود دارد. این استنیت باقیمانده به‌صورت دانه‌های کوچکی ($\delta = \sim 1\mu m$) در زمینهٔ مارتنزیت موجود است. برای آنکه یکی‌از این دانه‌های کوچك استنیت باقیمانده کاملا به‌مارتنزیت تبدیل شود، برچه فشاری درفلز باید غلبه شود؟

حل: برای سادگی، فرض‌کنید‌که تغییرات دانه ($\gamma \rightarrow M$) است، و بعد باید فشرده شود و به‌فضای اولیه در داخل زمینهٔ مارتنزیت صلب بازگردد.

ازمثال ۱۰-۱-۳ $\quad \frac{\Delta V}{V} = -0.018$ (منفی برای فشار)

از مثال ۶-۳-۲ $\quad K = 162700 MPa$

رابطهٔ (۶-۳-۵) $\quad P_h = K\left(\frac{\Delta V}{V}\right)$

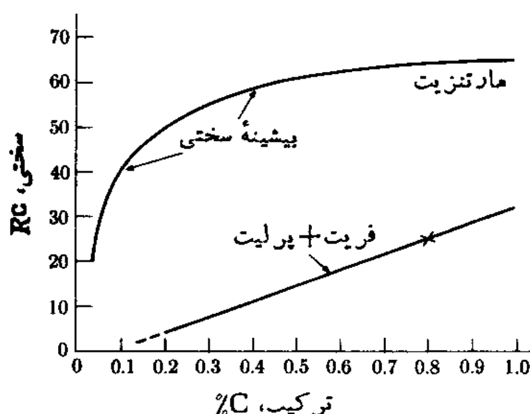
$$= (162700\ MPa)(-0.018)$$

فشار $= 2930 MPa$

توضیح. فرض برآن است کـه فلز مجاور مطلقاً صلب باشد. درواقع، مقداری از فشار را می‌گیرد و اندکی آن را کاهش می‌دهد. حتی در این‌صورت، تنشهای فشاری برای متوقف‌کردن واکنش ($\gamma \rightarrow M$) اندکی قبل‌از تکمیل، کافی‌اند. ▲

## ۱۱-۶ سختی‌پذیری

باید بین سختی وسختی‌پذیری تمایز قائل شد. سختی‌مقاومت در برابر تغییر شکل‌پلاستیکی




**شکل ۱۱-۶-۱** بیشینهٔ سختی برحسب مقدار کربن فولادهـای ساده. در این‌شکل بیشینهٔ سختی حاصل از پرلیت بـا مارتنزیت مقایسه شده‌است. برای رسیدن به‌بیشینهٔ‌سختی باید از واکنش $\gamma \rightarrow \alpha + C$ درحین‌آب‌دادن جلوگیری کرد.

است حال آنکه سختی‌پذیری نشاندهندهٔ «توانایی» ماده برای سخت‌شدن است.

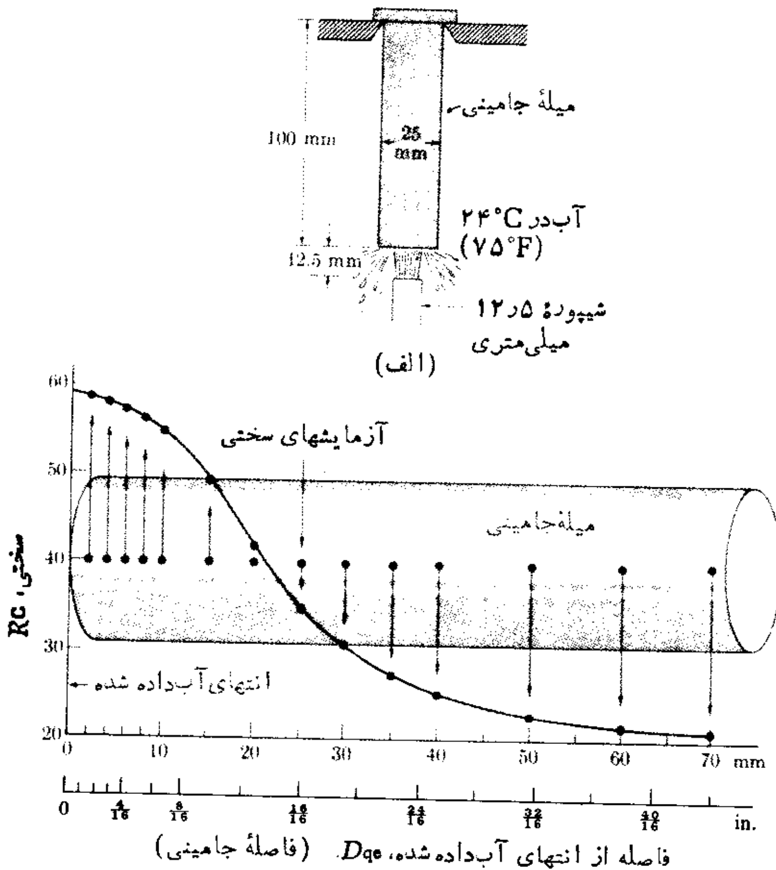
شکل ۱۱-۶-۱ بیشینهٔ سختی ممکن را برحسب افزایش مقدار کربن فـولاد نشان می‌دهد. این بیشینه درصورتی میسر است‌که ۱۰۰٪ مارتنزیت تشکیل شده‌باشد. فولادی‌که سریعاً از استنیت به «فریت + کاربید» تبدیل‌شود سختی‌پذیری کمی‌دارد، زیرا این‌فازهای حاصل از تبدیل در دمای بالا جایگزین مارتنزیت شده‌اند. برعکس فولادی‌که به‌آهستگی از استنیت به «فریت + کاربید» تبدیل می‌شود، سختی‌پذیری دارد، در چنین فولادی بدون آب‌دادن خیلی سریع می‌توان به‌بیشینهٔ سختی رسید ودر مرکز قطعه‌ای از این فولاد، بـا وجود آنکه سرعت سردشدن کمتر است، سختی بیشتری حاصل خواهد شد.

**منحنیهای سختی‌پذیری.** برای هـرفولادی رابطهٔ مستقیم و استواری بین‌سختی و سرعت سردکردن وجود دارد. ولی این رابطه غیرخطی است. علاوه براین اصول تئوری آنالیز کمی آن پیچیده است.* خوشبختانه امکان‌استفاده از آزمـایش استاندارد شده‌ای وجـود دارد که‌پیش‌بینی سختیها را دربسیاری ازکاربردها درمدت یك‌تا دودقیقه، و مقایسهٔ سختی فولادها را دریك نظر میسر مـی‌سازد. این آزمایش، آزمایش آب‌دادن انتهای جـامینی

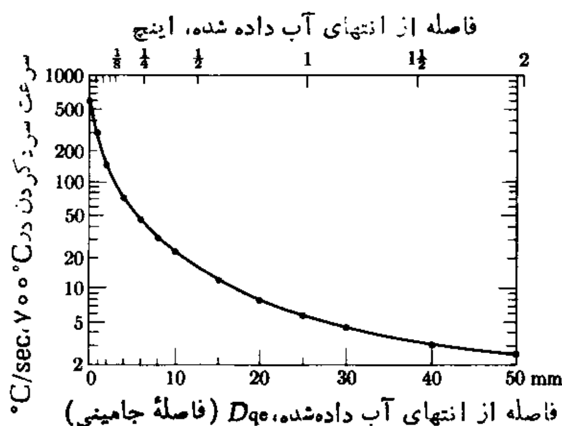
* متغیرهای موجود شامل یك‌یاچند عامل‌زیر است. عناصر آلیاژی ویا ناخالصی، اندازهٔ دانه و دمای استنیتی‌کردن. همچنین از شرح شکل ۱۱-۴-۱۰ به‌یاد بیاورید کـه سرعتهای سرد کردن در ۷۰۰°C محاسبه شده‌اند. این‌سرعت در دماهای پایینتر کاهش می‌یابد و قبل‌ازآنکه کاملا سرد شود به‌صفر می‌رسد.

نام دارد. در این آزمایش استاندارد شده، میله‌ای استوانه‌ای با ابعاد معین گرم می‌شود تا به‌استنیت تبدیل شود، سپس مطابق باشکل ۱۱ـ۶ـ۲ (الف) باجریان آبی که سرعت و فشار معینی دارد از یك انتها آب داده می‌شود. مقادیر سختی درطول میله، در امتداد گرادیان سرعت‌شدن با سختی‌سنج راکول اندازه‌گیری شده و منحنی سختی‌پذیری رسم می‌شود [شکل ۱۱ـ۶ـ۲ (ب)].

انتهای آب‌داده شده خیلی سریع سرد می‌شود و بنابراین در آن درصد کربن بخصوص، بیشینهٔ سختی‌ممکن‌را خواهد یافت. فولادی‌که پشت سطح آب داده شده‌قراردارد آهسته‌تر سرد می‌شود (شکل ۱۱ـ۶ـ۳) و درنتیجه سختی آن کمتر خواهد بود [شکل ۱۱ـ۶ـ۲ (ب)]. داده‌های‌مربوط به‌سرعت‌سردشدن شکل ۱۱ـ۶ـ۳ برای‌تمام فولادهای




**شکل ۱۱ـ۶ـ۲** آزمایش آب‌دادن انتها (جامینی).




**شکل ۱۱-۶-۳** سرعتهای سردکردن (در ۷۰۰°C) برحسب فاصله، $D_{qe}$، از انتهای آب‌داده شدهٔ میلهٔ جامینی (از آنجا که سرعت سردکردن باکم شدن دما بطور پیوسته کاهش می‌یابد، ۷۰۰°C به‌صورت مرجعی برای مقایسه انتخاب می‌شود. این‌دما برای بیشتر فولادهای کم آلیاژ تقریباً دمای اوتکتوییداست و بنابراین برای واکنش $\gamma \rightarrow \alpha + C$ بحرانی است.)

ساده یاکم آلیاژ صادق است زیرا دارای چگالی، ظرفیت گرمایی و رسانندگی گرمایی قابل مقایسه‌ای‌اند، سه‌خاصیتی که برنفوذپذیری گرمایی اثر می‌گذارند.*

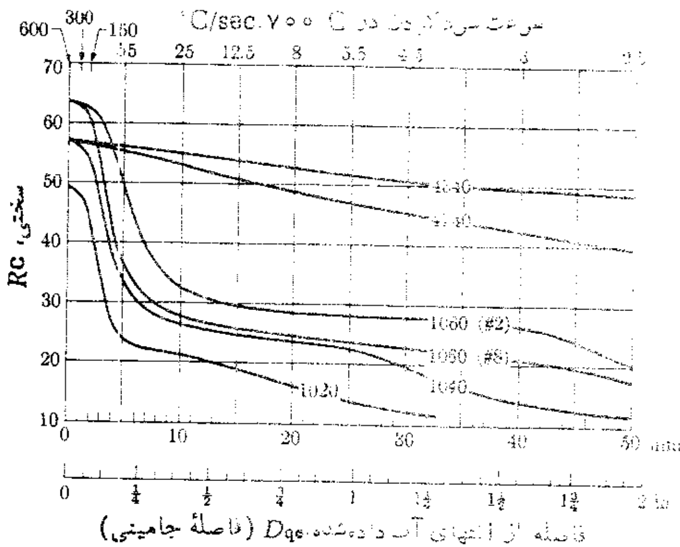
شکل ۱۱-۶-۴ منحنیهای سختی‌پذیری چندنوع فولاد متداول را نشان می‌دهد. این منحنیها نشاندهندهٔ سختی‌برحسب سرعت سردکردن‌اند، سرعتها درمحور بالایی برحسب °C/sec نشان داده شده‌است. ولی به‌طورکلی بهتر است «فاصلهٔ آن تا انتهای آب‌داده شده» یا $D_{qe}$ (یعنی فاصلهٔ جامینی) را به‌کار بریم، زیرا آن را از داده‌های آزمایشگاه می‌توان مستقیماً رسم کرد. ما این‌روش ساده را به‌کار خواهیم برد.**

از شکل ۱۱-۶-۴ چند نکته را می‌توان دریافت. فولادهای کم آلیاژ (۴۱۴۰ و ۴۳۴۰) در مقایسه بافولادهای ساده سختی‌پذیری بیشتری دارند یعنی برای‌سرعت سردشدن

---

* فولادهای زنگ‌نزن ازالگویی که درشکل ۱۱-۶-۳ دیده می‌شودتبعیت نمی‌کنند، زیرابالا بردن مقدارعناصر آلیاژی، رسانندگی گرمایی آنها را تاحد زیادی کاهش می‌دهدبی‌آنکه روی چگالی و یا ظرفیت گرمایی اثری داشته باشد. ولی این فولادها را به‌ندرت برای سخت‌شدن آب می‌دهند.

** یعنی در دومنحنی مختلف سختی‌پذیری فواصل مساوی از انتهای آب داده شده سرعتهای سردکردن ویژه‌ای دارند.




| | C | Mn | Ni | Cr | Mo | اندازهٔ دانه |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱۰۲۰ | ۰٫۲ | ۰٫۹۰ | ۰٫۰۱ | — | — | ۸ |
| ۱۰۴۰ | ۰٫۳۹ | ۰٫۸۹ | ۰٫۰۱ | ۰٫۰۱ | — | ۸ |
| ۱۰۶۰ | ۰٫۶۲ | ۰٫۸۱ | ۰٫۰۲ | — | — | ۲،۸ |
| ۴۱۴۰ | ۰٫۳۸ | ۰٫۷۹ | ۰٫۰۱ | ۱٫۰۱ | ۰٫۲۲ | ۸ |
| ۴۳۴۰ | ۰٫۴۰ | ۰٫۷۵ | ۱٫۷۱ | ۰٫۷۷ | ۰٫۳۲ | ۸ |

شکل ۱۱ـ۲۴ منحنی سختی‌پذیری شش نوع فولاد با اندازهٔ دانه و ترکیب مشخص. این فولادها طبق شکل ۱۱ـ۶ـ۳ (الف) از یک انتها آب‌داده شده‌اند. از نظر صنعتی هر فولاد، منحنی سختی‌پذیری ویژه‌ای دارد زیرا ترکیب آن با سایر فولادها کاملا یکسان نیست. در نتیجه معمولا آزمایش سختی‌پذیری در مورد هر فولادی که برای آب‌دادن و بازپخت تولید می‌شود انجام خواهد شد.

سختی آنها به بیشینهٔ ممکن نزدیکتر است. به‌ویژه برای فولاد C۴۰٪ مطابق با شکل ۱۱ـ۳ـ۱۱، بیشینهٔ سختی $۵۷R_C$ است. در $D_{qe} = ۱۰\,mm$ (که در آن سرعت سرد شدن برابر $۲۵^\circ C/sec$ است)، سختی فولادهای ۴۳۴۰ و ۴۱۴۰ به‌ترتیب برابر $۵۵R_C$ و $۵۳R_C$ است؛ سختی فولاد ۱۰۴۰ فقط $۲۶R_C$ است. همان‌طور که انتظار می‌رود فولادهایی که کربن بیشتری دارند سخت‌ترند (۱۰۶۰ نسبت به ۱۰۴۰ و نسبت به ۱۰۲۰)؛ این امر در مورد سرد کردن با سرعتهای زیاد ($D_{qe} = ۰\,mm$) و نیز در مورد سرد کردن با سرعتهای کم ($D_{qe} = ۳۰\,mm$) صادق است. بالاخره در مورد فولادهای ۱۰۶۰ منحنی دوم را می‌بینیم. فولاد درشت‌دانه (۲ #) سختی‌پذیری بیشتری دارد زیرا تجزیهٔ استنیت آهسته‌تر

صورت مـی‌گیرد. (به‌شکل ۱۱ـ۴ـ۸ رجوع کنید) یعنی بـرای سرعت سردکردن معین، استنیت درشت‌دانه نسبت به‌استنیت ریزدانه مارتنزیت بیشتری تولید می‌کند.*

**استفاده از منحنیهای سختی‌پذیری.** منحنیهای سختی‌پذیری کـه با روش آب‌دادن انتها به‌دست‌می‌آیند ارزش عملی زیادی‌دارند. زیرا(۱) بادانستن سرعت سردشدن‌فولاد می‌توان سختی را مستقیماً از روی منحنی سختی‌پذیـری آن تعیین کرد و (۲) اگر سختی درنقطه‌ای معین شود، با استفاده از منحنی سختی‌پذیری می‌توان سرعت سردشدن درآن نقطه را برای فولاد موردنظر به‌دست آورد.

شکل ۱۱ـ۶ـ۴ منحنی سختی‌پذیری‌را برای فولاد AISI-SAE ۱۰۴۰ بااندازهٔ دانـه و ترکیب مشخص نشان مـی‌دهد.** انتهای آب داده‌شده، دارای بیشینهٔ سختی ممکن برای فولاد ۴ر۰٪ کربن است زیرا بسیار سریع سرد شده و فقط مـارتنزیت تشکیل شده است. ولی اندکی دورتر از انتهای آب‌داده شده سرعت سردشدن آنقدر سریع نیست که از تشکیل فریت وکاربید جلوگیری کند، وبنابراین درآن نقطه بیشینهٔ سختی به‌دست نیامده است.

در آزمایشگاه می‌توان سرعت سرد شدن را در درون میله‌هـای فولادی نیز تعیین کرد. مثلا جدول ۱۱ـ۶ـ۱ سرعت‌سردشدن در دمای اوتکتوپید را برای سطح، نیمهٔ‌شعاع و مرکز میل گرد ۷۵ میلی‌متری درصورت سردکردن آرام در آب یـا روغن به‌هم زده‌شده نشان می‌دهد. این سرعتها با استفاده از ترموکوپلهایی که درحین آب‌دادن درون میله‌جـا داده شده بودند به‌دست آمده‌اند. برای میله‌هـای دیگری بـا قطرهای متفاوت نیز می‌توان این داده‌ها را به‌دست آورد. این داده‌ها درشکل ۱۱ـ۶ـ۵ خلاصه شده‌اند.

با استفاده از داده‌های شکل ۱۱ـ۶ـ۵ و منحنی سختی‌پذیری می‌توان سختی‌عرضی را در هرنقطه از فولاد آب داده شده پیش‌بینی کرد. مثلا سرعت سردشدن مـرکز میله‌ای به‌قطر ۷۵ میلی‌متر که در روغن سردشده برابر با ۵ر۵°C/sec است و چـون این‌سرعت سردشدن بـاسرعت سردشدن نقطه‌ای بـه‌فاصلهٔ ۲۵ میلی‌متر از انتهای آب داده‌شده میلـهٔ

---

* فولادهای دیگر شکل ۱۱ـ۶ـ۴ نیز منحنیهـای سختی‌پذیری مختلفی برای دیگر اندازهٔ دانه‌ها دارند. مزیت اصلی آزمایش آب‌دادن انتهای جـامینی آن است‌کـه می‌توان از همان فولادی‌که برای ساختن چرخ‌دنده، ابزار وغیره به‌کار مـی‌رود؛ نمونه‌ای درست‌کرد. بنابراین سختی‌پذیری دقیق آن مشخص‌می‌شود. بدین‌معنی‌که متغیرهایی مثل اندازهٔ دانه و اختلاف‌اندك درترکیب شیمیایی خود به‌خود درنظر گرفته می‌شود.

** این‌داده‌ها به‌ترکیب (واندازهٔ دانه) فولاد ۱۰۴۰ مربوطاند. تغییرات‌اندکی در مشخصات شیمیایی‌هرفولادممکن‌است (مثلا، درفولاد۱۰۴۰ ، ۳۷ر۰/۴۴ر۰=C، ۶۰ر۰/۹۰ر۰=Mn، ۰۵ر۰=S، ۰۴ر۰=P و ۱۵ر۰/۲۵ر۰=Si) درنتیجه ممکن است منحنیهای سختی‌پذیری دو فولاد ۱۰۴۰ متفاوت، اندکی تفاوت داشته باشند.

**جدول ۱۱ـ۶ـ۱** سرعت‌سردشدن میله فولادی به‌قطر ۷۵میلی‌متر (تقریباً ۳اینچ‌در ۷۰۰°C)

| محل | آب‌دادن در آب به‌هم‌زده شده | | آب‌دادن درروغن به‌هم زده‌شده | |
|---|---|---|---|---|
| | °C/sec | $D_{qe}$* | °C/sec | $D_{qe}$* |
| سطح | ~۱۰۰ | ۳ | ~۲۰ | ۱۱ |
| ۳/۴ شعاع | ۲۷ | ۹ | ۹٫۵ | ۱۸ |
| نیمهٔ شعاع | ۱۴ | ۱۴ | ۷٫۵ | ۲۱ |
| مرکز | ۱۱ | ۱۷** | ۵٫۵ | ۲۵ |

* فاصله از انتهای آب داده شده میلهٔ جامینی‌که همان سرعت سردکردن را در ۷۰۰°C دارد (فاصلهٔ جامینی).

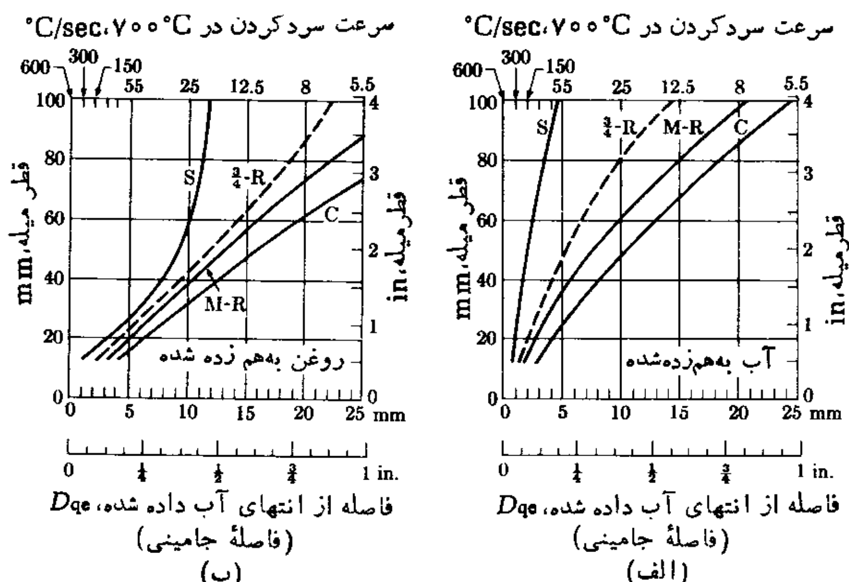
** مشاهده می‌شودکه هنگام آب‌دادن مرکز میله‌ای به‌قطر ۷۵ میلی‌متر، که ۳۷ میلی‌متر از سطح فاصله‌دارد، سرعت‌سردشدن همان سرعت‌سردشدن $D_{qe}$=۱۷mm است، وبنابراین بسیار سریعتر از فولادی است‌که ۳۷mm از انتهای آب داده‌شدهٔ میلهٔ جامینی فاصله دارد. (۱۱°C/sec نسبت به ۳٫۵°C/sec) البته گرما به‌طور شعاعی از میلهٔ ۷۵ میلی‌متری خارج می‌شود، ولی این‌کار در درجهٔ اول از یک‌سر میلهٔ جامینی صورت می‌گیرد.

جامینی برابر است سختی این دونیز مساوی خواهد بود. به‌این ترتیب اگر میله از فولاد ۱۰۴۰ باشد (شکل ۱۱ـ۶ـ۴) سختی مرکز آن‌برابر $23R_C$ خواهد بود. شکل ۱۱ـ۶ـ۴ همچنین منحنیهای زیر را برای مرکز میله‌های فولادی آب داده شده در روغن، به‌قطر ۷۵ میلی‌متر نشان می‌دهد (۵٫۵°C در هرثانیه سرد شده است):

| AISI-SAE: | ۱۰۴۰ | ۴۱۴۰ | ۱۰۲۰ | ۴۳۴۰ | (اندازهٔ دانهٔ ۸) ۱۰۶۰ | (اندازهٔدانهٔ ۲) ۱۰۶۰ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| RC: | ۲۳ | ۴۷ | ۱۴ | ۵۲ | ۲۴ | ۲۸ |

درمثالهای زیرسختی فولادهای مختلف آب داده شده مختصراً مطرح شده است.

**سختی پس‌از بازپخت.** مثالهای ۱۱ـ۶ـ۳ و ۱۱ـ۶ـ۴ سختی فولاد آب داده‌شده را بیان می‌کنند. چنانکه شکل ۱۰ـ۳ـ۹ نشان می‌دهد هنگام بازپخت، براثر تجمع ذرات




**شکل ۱۱-۶-۵** سرعت سردشدن درمیله‌های فولادی استوانه‌ای که الف) درآب به‌هم‌زده شده و ب) در روغن به‌هم زده شده سرد شده‌اند. محور افقی بالایی سرعت سردشدن در ۷۰۰°C و محور افقی پایینی نقاط معادل آن از نظر فاصله با انتهای آب داده شده است. (C مرکزمیله، M-R وسط‌شعاع، S سطح، و خط‌چینها، منحنی تقریبی برای ۳/۴ شعاع است). سرعت سرد کردن درآب به‌دلیل داشتن گرمای تبخیر زیاد، بسیار بالاست.

کاربید، سختی کاهش می‌یابد. داده‌های شکل فوق برای فولاد اوتکتویید ساده‌ای (۱۰۸۰) رسم شده است. فولادهای آلیاژی آهسته‌تر بازپخت می‌شوند.* مهندسانی که با عملیات گرمایی‌انواع فولادهاسروکار دارند می‌توانند داده‌های‌لازم برای بازپخت را از کتابهای متالورژی به‌دست آورند.

**مثال ۱۱-۶-۱ سرعت سردکردن مرکز و وسط شعاع میله‌ای استوانه‌ای به قطر ۲۵ میلی‌متر را وقتی که در آب به‌هم زده شده آب داده می‌شود معین**

---

* مثلا فولاد ابزار «تندبر» عناصری چون V، Cr، W و Mo دارد که کاربیدهای بسیار پایداری تشکیل می‌دهند. ذرات کاربید این‌عناصر بسیار کندتر از $Fe_3C$ در فولاد ساده تجمع می‌یابند. بنابراین‌فولادهای ابزار را می‌توان در دماهای بالاتر (عمل باسرعت بیشتر) استفاده کرد بدون آنکه مسائلی‌نظیر بیش‌از حد بازپخت‌شدن، نرم‌شدن، و از بین رفتن لبه‌های برنده درآنها به‌صورت بحرانی وجود داشته باشد.

کنید. (میله به حدی بلند است که اثر سرد شدن انتهای میله در اینجا مطرح نیست.)

حل: با توجه به شکل ۱۱–۶–۵ (الف) برای میلهٔ استوانه‌ای به‌قطر ۲۰ میلی‌متر داریم

$D_{qe} = ۴\ mm$ : سرعت سرد کردن مرکز

ازشکل ۱۱–۶–۳ [یا از محور بالایی شکل ۱۱–۶–۵ (الف)] داریم

$۷۵°C/sec =$ سرعت سرد کردن

$D_{qe} = ۲٫۵mm, \sim ۱۲۵°C/sec$ : سرعت‌سردکردن وسط شعاع

توضیح. می‌بینید که مرکز میلهٔ ۲۰ میلی‌متری ازسطح میله، ۱۰ میلی‌متر فاصله دارد. ولی سرعت سردشدن آن بسیار سریعتر از نقطه‌ای است که از انتهای میلهٔ جامینی ۱۰ میلی‌متر فاصله دارد وسرعت سردشدن آن ۲۵°C/sec است. این سرعت بیشتر است‌زیرا گرما نه‌فقط درجهت طولی بلکه درجهات شعاعی خارج می‌شود. علاوه براین ذخیره‌ای از گرما وجود دارد که باید از نقطه‌ای که ۲۰ میلی‌متر از انتهای آب داده شدهٔ میله فاصله دارد بگذرد. ▲

**مثال ۱۱–۶–۲** درنقطه‌ای به‌فاصلهٔ ۵ میلی‌متر از سطح میلهٔ ۴۰میلی‌متری از فولاد ۴۱۴۰ که در روغن به‌هم زده شده آب داده شده‌است، سختی چقدر است.

حل: ازآنجا که شعاع ۲۰ میلی‌متر است این‌نقطه در ۳/۴ شعاع قرار دارد

از شکل ۱۱–۶–۵ $\qquad D_{qe} = ۹^{+}mm$ (و $CR \sim ۲۷°C/sec$)

از شکل ۱۱–۶–۴ $\qquad$ سختی $= ۵۴\ R_C$

توضیح. داده‌ها را می‌توان با درون‌یابی منحنیهای ۱۱–۶–۴ و ۱۱–۶–۵ به‌دست آورد. برای این‌کار توصیه می‌شود که به‌جای °C/sec از $D_{qe}$ استفاده شود، زیرا °C/sec تاحد زیادی غیرخطی است. ▲

**مثال ۱۱–۶–۳** سختی‌عرضی دومیلهٔ‌فولادی به‌قطر ۳۸میلی‌متر را که ترکیب آنها به‌ترتیب AISI–SAE ۱۰۴۰ و ۴۱۴۰ است و در آب، آب‌داده شده‌اند رسم کنید.

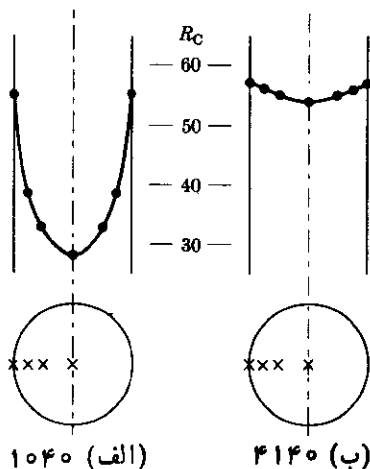
حل:

از روی شکل ۱۱ـ۶ـ۵ (الف) — از روی شکل ۱۱ـ۶ـ۴

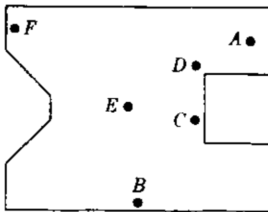
| محل | سرعت سردشدن تقریبی در ۷۰۰°C (°C/sec) | $D_{qe}$* | سرعت سرد شدن در ۷۰۰°C $D_{qe}$* | AISI–SAE ۱۰۴۰ | AISI–SAE ۴۱۴۰ |
|---|---|---|---|---|---|
| سطح | ۲۰۰ | ۱٫۵mm | ۱٫۵mm | ۵۵ $R_C$ | ۵۷ $R_C$ |
| $\frac{۳}{۴}$شعاع | ۷۵ | ۴mm | ۴mm | ۳۸ $R_C$ | ۵۶ $R_C$ |
| وسط‌شعاع | ۵۵ | ۵mm | ۵mm | ۳۴ $R_C$ | ۵۵ $R_C$ |
| مرکز | ۳۵ | ۷٫۵mm | ۷٫۵mm | ۲۸ $R_C$ | ۵۴ $R_C$ |

* $D_{qe}$ سرعت سردشدن، برحسب فاصله از انتهای آب‌داده شدهٔ میلهٔ جامینی.

توضیح. سختی عرضی دو فولاد مثال ۱۱ـ۶ـ۳ را شکل ۱۱ـ۶ـ۶ نشان می‌دهد. گرچه سختی سطحی دوفولاد بسیار نزدیک به‌یکدیگر است، تفاوت سختی‌پذیری آنها موجب به‌وجود آمدن سختی بیشتری در مرکز فولاد AISI–SAE ۴۱۴۰ می‌شود همان‌طور




**شکل ۱۱ـ۶ـ۶** سختی عرضی.
(مثال ۱۱ـ۶ـ۳ را ببینید.)




**شکل ۱۱-۶-۷** مقطع‌میلهٔ v. (مثال ۱۱-۶-۴ را ببینید).

که نشان داده شده است این فولاد عناصر آلیاژی بیشتری دارد که سرعت تبدیل استنیت به‌فریت و کاربید را کاهش می‌دهد. درنتیجه مارتنزیت بیشتری می‌تواند تشکیل شود. ▲

**مثال ۱۱-۶-۴** در شکل ۱۱-۶-۷ مقطع میلهٔ فولادی V شکل از جنس فولاد ۱۰۶۰ AISI-SAE (عدد اندازهٔ دانهٔ ۲) نشان داده‌است. پس‌از آب‌داده شدن در روغن، سختی نقاط مختلف چنین است:

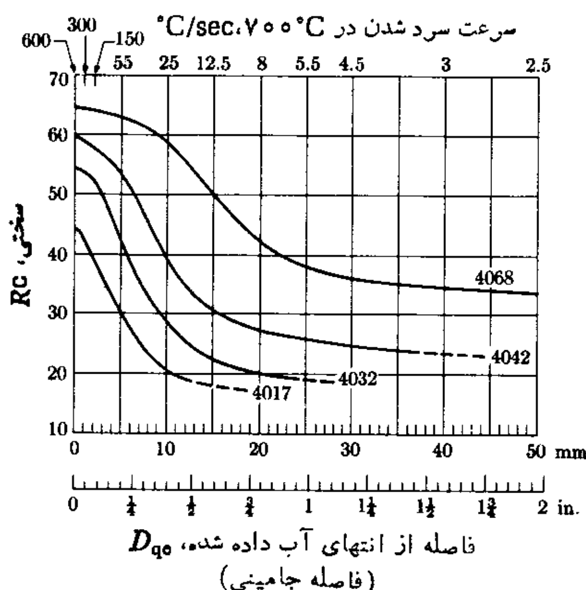
$$A-۴۰R_C, B-۴۶R_C, C-۳۳R_C, D-۳۲R_C, E-۳۱R_C, F-۶۳R_C$$

سختی چنین نقاطی را برای میلهٔ مشابهی از فولاد AISI-SAE ۴۰۶۸ به‌دست آورید.

حل: برای فولاد داده‌شده، سختی به‌سرعت سردشدن بستگی دارد.

| نقطه | سختی | سرعت تقریبی سردشدن $D_{qe}$* | سرعت سردشدن در ۷۰۰ °C $D_{qe}$* | سختی |
|---|---|---|---|---|
| | AISI-SAE ۱۰۶۰ (عدد اندازهٔ دانهٔ ۲) از شکل ۱۱-۶-۲ | | AISI-SAE ۴۰۶۸ ازشکل ۱۱-۶-۸ | |
| $A$ | ۴۰ $R_C$ | ۷mm | ۷mm | ۶۲$R_C$ |
| $B$ | ۴۶ | ۸ | ۸ | ۶۱ |
| $C$ | ۳۳ | ۱۰ | ۱۰ | ۵۹ |
| $D$ | ۳۲ | ۱۱ | ۱۱ | ۵۷ |
| $E$ | ۳۱ | ۱۲ | ۱۲ | ۵۵ |
| $F$ | ۶۳ | ۱ | ۱ | ۶۴ |

* $D_{qe}$ سرعت سردشدن، برحسب فاصله ازانتهای آب داده شدهٔ میله جامینی. ▲




**شکل ۱۱-۶-۸** منحنیهای سختی‌پذیری فولادهای ۴۰××. به‌استثنای مقدار کربن، ترکیب تمام این فولادها یکسان است. مقدار کربن بیشتر طبق شکل ۱۱-۶-۱ مارتنزیت سخت‌تر و $\alpha+\overline{C}$ سخت‌تری به‌وجود می‌آورد.

**مثال ۱۱-۶-۵** میله‌ای از فولاد ۱۰۲۰ (به‌قطر ۳۲میلی‌متر) درسطح تا ۶۲ر۰٪C و در ۲ میلی‌متری زیر سطح تا ۳۵ر۰٪C کربن‌دهی شده است به‌طوری‌که ۴میلی‌متر زیرسطح بدون تأثیر باقی مانده است.

الف) تغییرات سختی فولاد را پس‌از آب‌دادن درآب معین کنید.

ب) اگر کربن‌دهی نمی‌شد تغییرات سختی به‌چه‌صورت بود؟ (عدداندازهٔ دانه = ۸)

حل:

| | $D$ | (الف) | | (ب) | |
|---|---|---|---|---|---|
| سطح | ۱ر۵mm | ۶۲ر۰٪C | $۶۲R_C$ | ۲۰ر۰٪C | $۴۷R_C$ |
| ۲میلی‌متری | ~۲ر۵ | ۳۵ر۰ | ~۵۰ | ۲۰ر۰ | $\sim۴۰R_C$ |
| ۴میلی‌متری | ۳ | ۲۰ر۰ | ۳۴ | ۲۰ر۰ | ۳۴ |
| نیمهٔ شعاع | ۴ | ۲۰ر۰ | ۲۶ | ۲۰ر۰ | ۲۶ |
| مرکز | ۶ر۵ | ۲۰ر۰ | ۲۲ | ۲۰ر۰ | ۲۲ ▲ |

## مرور و بررسی مطالب

فرایندهای تابکاری شامل گرم کردن و سرد کردن آهسته است. این فرایندها امکان نزدیك‌شدن ماده به‌حالت تعادل را فراهم می‌آورند. میکروساختار و خواص حاصل تابعی است از ماده‌ای که تابکاری می‌شود. در بعضی مواد تابکاری موجب تنشگیری می‌شود؛ در بعضی دیگر تبلور مجدد صورت می‌گیرد؛ درتمام موارد فلز نرم می‌شود؛ معمولا اگر فقط یك فاز وجود داشته باشد انعطاف‌پذیری افزایش می‌یابد، ولی اگر میکروساختار حاصل مسیری با تردی زیاد برای پیشروی ترك ایجاد کند، انعطاف‌پذیری کم می‌شود.

فرایندهای یکنواخت‌کردن برای‌ایجاد یکنواختی بیشتر در محصول، ازنظر ترکیب شیمیایی و یا میکروساختار طراحی شده‌اند.

سردکردن سریع مانع ایجاد تعادل می‌شود. در ساده‌ترین صورت می‌توانیم محلول جامد را در دماهای زیر حدحلالیت نیز نگه‌داریم. این‌کار بیش‌از هرکار دیگری سختی را بالا می‌برد. این‌امر همچنین مرحله‌ای از فرایند پیرسختی یعنی رسوب کردن همدما در دمای پایین* است.

تبدیل همدمای $\gamma\rightarrow(\alpha+\overline{C})$ در فولاد از منحنی کلی C تبعیت می‌کند. تبدیل با سردکردن مداوم بیش‌از همه معمول است، ولی به‌سرعت سردکردن (CR) معینی نیاز دارد. با سردکردن سریع (آب‌دادن) از واکنش معمولی اوتکتوید جلوگیری شده و مارتنزیت‌سخت تشکیل‌می‌شود. فولادهای آلیاژی سختی‌پذیری بیشتری‌دارند زیرا سرعت بحرانی سردکردن لازم برای تشکیل مارتنزیت در این فولادها کمتر است؛ برعکس، فولادهای آلیاژی نسبت به‌فولادهای ساده‌ٔ کربنی خیلی زودتر بیشینهٔ سختی ممکن را در سرعت معین سردکردن به‌دست می‌آورند. منحنیهای سختی‌پذیری امکان برآورد تغییرات سختی را توسط آزمایشهای استاندارد شدهٔ آب‌دادن انتهایی فراهم می‌آورند.

مثالهای این‌فصل در درجهٔ اول درمورد فلزات و به‌ویژه فولادها بود، زیرا عملیات گرمایی آنها گسترش وسیعی یافته و اصلاح شده است. ولی همین مفاهیم درمورد سایر مواد نیز به‌کار می‌روند. مثلا شیشه را می‌توان ابتدا توسط تغییرشکل ویسکوز شکل داد و سپس عملیات گرمایی کرد تا توسط تبلور شیشه‌ای محصولی محکمتر ایجاد شود.

## سؤالات تشریحی

۱. چرا نفوذ، تبلور مجدد، تنشگیری (بخش۷ـ۵)، وجریان ویسکوز (بخش ۸ـ۸)روابط مشابهی درمورد زمان ودما دارند؟

۲. تفاوت بین یکنواخت‌کردن فولاد و تابکاری کامل آن را ذکر کنید. اساس این تفاوتها ازنظر فنی چیست؟

---

* زیر «زانویی» منحنی C.

۳. دمای انتقال شیشه $T_g$ با دمای نقطهٔ تابکاری شیشه $(\eta = 10^{12}\ pa \cdot s)$ و دمای نقطهٔ کرنش $(\eta = 10^{13.5}\ Pa \cdot s)$ چگونه مقایسه می‌شود؟

۴. چرا فوق‌گرمایش در واکنش عملیات محلولی مشکلتر از فوق‌سرمایش در واکنش رسوب‌کردن به‌وجود می‌آید؟ دو دلیل ذکر کنید.

۵. تغییرات داده‌های جدول ۱۱-۳-۱ را تشریح کنید.

۶. به‌عنوان کار تولیدی عملی، چرا آب‌دادن آلیاژ 96Al-4Ca تا دمای اتاق و سپس گرم‌کردن مجدد تا $100°C$ برای پیرسختی، ساده‌تر از آب‌دادن مستقیم تا دمای $100°C$ است؟

۷. الف) با مراجعه به‌نمودارهای فازی فصل ۹، چه آلیاژهایی برای رسوب سختی انتخاب می‌شوند؟ ب) برنج Cu-Zn هرگز پیرسختی نمی‌شود. چرا؟

۸. فولادی که برای قوطیهای مواد غذایی به‌کار می‌رود کمتر از ۰٫۱٪ کربن دارد، به‌طوری که قابل تغییرشکل است. بنابرین جوابگوی عملیات آب‌دادن و بازپخت نیست؛ ولی درحین فرایند بسته‌بندی مواد غذایی اندکی سخت می‌شود. دلیلی بر آن ذکر کنید.

۹. قانون اهرم را نمی‌توان برای نمودار تبدیل همدما به‌کار برد. چرا؟

۱۰. چرا منحنی «شروع» درشکل ۱۱-۴-۶ در بازوی بالایی خود دوشاخه دارد؟

۱۱. به‌طورکلی تعیین آغاز (یا پایان) هرواکنش (در مقایسه با نقطهٔ وسط) بسیار مشکل است. دو دلیل بیاورید. (راهنمایی: به‌همین دلیل است که $M_s$ معمولا ۱٪~ واکنش درنظر گرفته می‌شود؛ و $M_F$ معمولا ۹۹٪ کامل به‌حساب می‌آید.)

۱۲. چرا استنیت درفولاد ریزدانه سریعتر به $(\alpha + \bar{C})$ تبدیل می‌شود تا در فولاد درشت دانه؟

۱۳. چرا استنیت فولاد 2Cr٪ آهسته‌تر از استنیت در فولاد 0.7Cr٪، به $(\alpha + \bar{C})$ تبدیل می‌شود.

۱۴. وسایل آزمایشگاهی لازم برای وقوع تبدیل همدما درمدت ۱ ثانیه $(\pm 10\%)$ در فولاد را طرح کنید.

۱۵. چرا از شکل ۱۱-۴-۶ برای سیم (ج)، مرحلهٔ ۳، مثال ۱۱-۴-۱ استفاده نمی‌کنیم؟

۱۶. در نمودار I-T، شکل ۱۱-۴-۶ منحنی $t_f$ قبل از آنکه منحنی $M_f$ را قطع کند به‌انتها می‌رسد. دلیل آن را ذکر کنید.

۱۷. مارتنزیت بازپخت‌شده، پرلیت، بینیت، مارتنزیت، پرلیت‌کروی، فریت، وکاربید را باهم مقایسه کنید.

۱۸. فرض کنید $CR_M$ و $CR_P$ برای فولادی به‌ترتیب $74°C/sec$ و $15°C/sec$ باشد. اگر فولاد با سرعت $10°C/sec$ سرد شود، چه فازهایی موجود خواهد بود؟ با $20°C/sec$؟ با $50°C/sec$؟ وبا $100°C/sec$ چطور؟

۱۹. فرض‌کنید همان $CR_M$ و $CP_R$ که درسؤال ۱۸ ذکر شده است، برقرار باشد. اگر این‌فولاد با سرعت $10°C/sec$ سرد شود، سخت‌تر از زمانی که باسرعت $5°C/sec$

سرد شود خواهد بود. چرا؟ (هردو فقط شامل $\alpha$ و $\bar{C}$ خواهند بود.)

۲۰. منحنیهای $t_s$ و $t_F$ مربوط به‌تبدیل همدما برای تبدیل با سردکردن مداوم «به‌طرف پایین و به‌طرف راست تغییر محل می‌دهند (شکل ۱۱-۴-۱۰)» چرا $M_s$ و $M_F$ درهردو فرایند یکسان باقی می‌مانند؟

۲۱. توضیح دهید که چرا فولادهای کم‌آلیاژ معمولا به‌صورت فولادهایی‌که با آب‌دادن وبازپخت عملیات گرمایی می‌شوند مشخص می‌شوند.

☐ ۲۲. بینیت را نمی‌توان با سردکردن مداوم فولاد ۱۰۸۰ به‌دست آورد. چرا؟

☐ ۲۳. تفاوت بین سختی وسختی‌پذیری را شرح دهید.

☐ ۲۴. چرا وقتی چرخ‌دنده آب داده می‌شود فولاد (یا آب) باید غیرساکن باشد؟

☐ ۲۵. چرا مرکز میلهٔ فولادی استوانه‌ای به‌قطر۲۵میلی‌متر باآب‌دادن سختی‌بیشتری‌می‌یابد تا فولادی‌که ۲۵ میلی‌متر پشت انتهای میلهٔ جامینی قراردارد؟کدامیك سریعتر آب داده می‌شود؟

☐ ۲۶. دمایی‌که برای‌کربن‌دهی انتخاب شده معمولا همان است‌که برای یکنواخت‌کردن به‌کار می‌رود. چرا دمایی درگسترهٔ $\alpha$ به‌کار نمی‌رود تاکربن سریعتر در آن ساختار نفوذکند؟ چرا دمای بیشتری درگسترهٔ $\gamma$ به‌کار نمی‌رود؟

## مسائل

۱۱-۱-۱ آلیاژ مسی که ۳۵٪ سردکاری شده، پس از یك‌ساعت در ۲۹۵°C (۵۶۴°F) تبلور مجدد یافته است (تا ۵۰٪ کامل شده است). در ۳۲۵°C (۶۱۷°F) زمان لازم فقط ۱۵ دقیقه بود. برای اینکه این تبلور مجدد درمدت ۶ ثانیه تا ۵۰٪ کامل شود. کمینهٔ‌دمای لازم برای گرمکاری چقدر است؟

جواب: ۴۶۶°C (۸۷۱°F)

۱۱-۱-۲ دمایی برای تابکاری (الف) فولاد ۱۰۴۰؛ (ب) فولاد ۱۰۸۰؛ (ج) فولاد ۱٪ کربن انتخاب کنید.

☐ **۱۱-۱-۳ چه‌دمایی را برای‌تابکاری فولادی‌حاوی ۵ر۲٪ نیکل و ۵ر۰٪کربن‌پیشنهاد می‌کنید؟**

جواب: ۷۶۰°C

۱۱-۱-۴ برای‌تشکیل‌پرلیت‌کروی درفولاد ۱۰۹۰ عملیات‌گرمایی مناسب‌را انتخاب‌کنید.

۱۱-۲-۱ (الف) برای یکنواخت کردن فولاد ۱۰۳۰ چه دمایی باید به‌کار رود؟ (ب) فولاد ۱۰۸۰ چطور؟ (ج) فولاد ۱٪کربن چطور؟

جواب: (الف) ۸۸۰°C

□ ۱۱-۲-۲ دمای یکنواخت‌کردن فولاد مثال ۹-۹-۱ چقدراست؟

**۱۱-۲-۳** بیست کیلوگرم از آلیاژ 8Al-92Mg ابتدا ذوب و سپس سریعاً تا ۵۰۰°C سرد شده است. از آنجاکه زمان کافی برای نفوذ در جامــد وجود نداشته است، ترکیب میانگین ε، ۵Al٪ است. (الف) ترکیب مایع در ۵۰۰°C چیست؟ (فرض کنید نفوذ در مایع سریع باشد.) (ب) چه‌مقــدار مایع در ۵۰۰°C موجود است؟ (ج) در چه دمایی γ پدیدار خواهد شد؟ (د) ترکیب مایع نهایی چیست؟

جواب: (الف) 23Al–77Mg (ب) ۳٫۳kg (ج) ۴۳۷°C (د) 32Al –68 Mg

۱۱-۳-۱ درفلزی اگر زمــان پیرشدن در دمای ۳۸۰°C ده ثانیه باشد، یا در ۳۱۵°C ۱۰۰ ثانیه باشد، بیشینهٔ سختی به‌دست می‌آید. هیچیك از اینها برای تولید مناسب‌نیستند زیرا نمی‌توانیم به یکنواخت‌گرم‌شدن قطعات اطمینان داشته‌باشیم. دمایی را پیشنهادکنید که درآن بیشینهٔ سختی در ۱۰۰۰ ثانیه (۱۵ دقیقه-۲۰دقیقه)، که زمان مناسب برای‌تولید است، به‌دست آید.

جواب: ۲۶۰°C~

۱۱-۳-۲ چه زمانی طول می‌کشد تا فلز مسئلهٔ قبل در ۱۰۰°C به بیشینهٔ سختی برسد؟

۱۱-۳-۳ توضیح دهید چرا آلیاژ ۹۲٪مس، ۸٪نیکل را می‌توان (یا نمی‌توان) پیرسختی کرد.

۱۱-۳-۴ توضیح دهید چرا آلیاژهای زیر را می‌توان (یا نمی‌توان) برای پیرسختی در نظر گرفت. (الف)۹۷٪ آلومینیم، ۳٪مس. (ب)۹۷٪ مس،۳٪ روی. (ج) ۹۷٪ نیکل، ۳٪ مس. (د)۹۷٪مس، ۳٪ نیکل.(ه)۹۷٪ آلومینیم،۳٪منیزیم. (و)۹۷٪ منیزیم،۳٪ آلومینیم.

۱۱-۳-۵ اگر فولادی (0C‌،۰٫۳w و ۹۹٫۷ w/oFe )از ۷۰۰°C (۱۳۰۰°F) آب داده شود، و دوباره گرم شده و بــه مــدت ۳ ساعت در ۱۰۰°C نگه داشته شود، اندکی پیرسختی درآن دیده می‌شود. دلیل این سختی چیست؟

جواب: حلالیت کربن در فریت کاهش می‌یابد.

۱۱-۳-۶ یك سازندهٔ هواپیما محمولــه‌ای از میخ پرچمهایی از آلیاژ آلومینیم دریافت کرده‌است که قبلا پیرسختی شده‌اند. آیا می‌توان آنها را مجدداً قابل استفاده‌کرد؟ شرح دهید.

**۱۱-۳-۷** (با مراجعه به شکل ۱۱-۳-۳) نموداری را انتخاب‌کنید که ارتباط بین دما و زمان را برای حداکثر سختــی نشان دهد و تخمین‌زدن زمان رسیدن به‌حداکثر سختی در ۱۰۰°C (توسط شکل) را ممکن سازد. این‌زمان برای آلومینیم ۲۰۱۴ چقدر است؟

جواب: تقریباً ۲۰۰۰ ساعت.

**۱۱-۳-۸** با استفاده ازشکل (طبق‌مسئلهٔ ۱۱-۳-۷) زمان لازم برای رسیدن به ۲۰۰MPa در ۱۰۰°C را تخمین بزنید.

**۱۱-۴-۱** قطعهٔ کوچکی از فولاد ۱۰۸۰ تا ۸۰۰°C گرم‌شده، تا ۶۰°C– آب داده‌شده، بلافاصله تا ۳۰۰°C مجدداً گرم شده و به‌مدت ۱۰ ثانیه در آن دما نگه‌داشته شده است. درپایان این مدت چه فازهایی وجود دارند؟

جواب: مارتنزیت (با بازپخت مناسب تبدیل به α+کاربید می‌شود).

**۱۱-۴-۲** مقداری فولاد ۱۰۴۵ باسرعت از ۸۵۰°C تا ۴۰۰°C آب داده‌شده و به‌مدت ۱ ثانیه؛ ۱۰ ثانیه؛ ۱۰۰ ثانیه در آن‌دما نگه‌داشته‌شده‌است. چه‌فازهایی درهرحالت‌موجود خواهندبود؟

**۱۱-۴-۳** مقداری فولاد ۱۰۴۵ به سرعت از ۸۵۰°C تا ۴۲۵°C آب داده شده است و قبل‌از آب‌دادن مجدد تا ۲۰°C، به‌مدت ۵ ثانیه در ۴۲۵°C نگه داشته شده‌است. (الف) درست قبل‌از آب‌دادن ثانوی چه فازهایی موجود خواهندبود؟ ترکیب هرکدام‌را مشخص کنید. (ب) بلافاصله پس‌از آب‌دادن ثانوی چه فازهایی موجود خواهند بود؟

جواب: (الف) (γ(%۰٫۴۵C)، α (%۰٫۰۲C) و C̄(%۶٫۷)؛ب) M(%۰٫۴۵C)، α، و C̄

**۱۱-۴-۴** مسئلهٔ ۱۱-۴-۳ را تکرار کنید ولی این بار به‌جای ۲۰°C، ۲۷۵°C را قرار دهید.

**۱۱-۴-۵** قطعه‌ای از فولاد ۱۰۲۰ را در ۷۹۰°C (۱۴۵۰°F) به تعادل رسانده و سریعاً تا ۴۰۰°C آب داده‌ایم. فولاد چه مدتی باید در آن دما نگه داشته شود تا به‌نقطهٔ میانی تجزیهٔ استنیت برسد؟

جواب: تقریباً ۸ثانیه.

**۱۱-۴-۶** نمودار تبدیل همدما را برای فولاد ۱٫۰w/o C و ۹۹٫۰w/oFe رسم کنید.

**۱۱-۴-۷** نمودار تبدیل همدما را برای فولاد ۱۰۲۰ رسم کنید.

جواب: $M_s = ۴۵۰°C$؛ $M_f = ۲۹۰°C$؛ α و γ بین ۷۲۷°C و ۸۵۵°C مدتها پایدار باقی می‌مانند؛ در ۵۵۰°C منحنی نسبت به‌فولاد ۱۰۴۵ بیشتر به‌طرف چپ متمایل‌می‌شود.

**۱۱-۴-۸** روی شش‌نمونه سیم‌مختلف ازفولاد AISI–SAE ۱۰۴۵ یکی‌از شش‌عملیات گرمایی زیرانجام می‌شود. فازهایی‌راکه بلافاصله پس‌ازکامل‌شدن هر مرحله وجودخواهد داشت ذکر کنید.

(الف) گرم کردن تا $825^\circ C$ #، آب‌دادن تا $550^\circ C$، نگه داشتن به‌مدت ۱۰ ثانیه دراین دما؛
(ب) گرم کردن تا $900^\circ C$ #، آب‌دادن تا $550^\circ C$، نگه‌داشتن به‌مدت ۱۰ ثانیه دراین دما، آب‌دادن تا $250^\circ C$؛
(ج) گرم کردن تا $925^\circ C$ #، آب‌دادن تا $300^\circ C$، نگه‌داشتن دراین دما؛ #
(د) گرم کردن تا $700^\circ C$ #، آب‌دادن تا $250^\circ C$؛
(ه) گرم کردن تا $250^\circ C$ #، گرم کردن تا $425^\circ C$، نگه‌داشتن دراین دما به‌مدت ۱ ثانیه؛
(و) گرم کردن تا $750^\circ C$ #، آب‌دادن تا $550^\circ C$.

**۱۱-۴-۹** صد گرم از فولاد AISI-SAE ۱۰۴۵ به‌روشی که درزیرآمده، حرارت و آب داده شده‌است. فاز(ها) و مقدار هر فاز را برحسب گرم در پایان هرمرحله ذکر کنید.
الف) گرم کردن تا $825^\circ C$ #، آب‌دادن تا $120^\circ C$؛
ب) گرم کردن تا $750^\circ C$ #، آب‌دادن تا $20^\circ C$؛
ج) گرم کردن تا $825^\circ C$ #، آب‌دادن تا $550^\circ C$،نگه‌داشتن به‌مدت ۷ ثانیه دراین دما، گرم کردن تا $250^\circ C$ #.
د) گرم کردن تا $825^\circ C$ #، آب‌دادن تا $550^\circ C$ نگه‌داشتن به‌مدت ۱۰ ثانیه گرم کردن تا $750^\circ C$ #.

جواب: الف) $M\ 100g$ ،ب) $\alpha 30g, M 70g$ (ج) $\alpha 93g$، $7g$ کاربید (د) $\alpha 30g, \gamma 70g$

**۱۱-۴-۱۰** سیم کوچکی‌ازفولاد AISI-SAE ۱۰۴۵ طی مراحل متوالی تحت عملیات زیر قرار می‌گیرد:
۱) گرم کردن تا $875^\circ C$، نگه‌داشتن درآن‌دما به‌مدت ۱ساعت؛
۲) آب‌دادن تا $250^\circ C$، نگه‌داشتن درآن‌دما به‌مدت ۲ ثانیه؛
۳) آب‌دادن تا $20^\circ C$، نگه‌داشتن درآن‌دما به‌مدت ۱۰۰ ثانیه؛
۴) گرم کردن مجدد تا $550^\circ C$، نگه‌داشتن درآن‌دما به‌مدت ۱ساعت؛
۵) آب‌دادن تا $20^\circ C$ و نگه‌داشتن درآن‌دما.
فازها یا ساختارهای موجود را پس‌ازهرمرحله ازعملیات گرمایی شرح دهید.

**۱۱-۴-۱۱** (الف) مسئلهٔ ۱۱-۴-۱۰ را بامراحل (۱)، (۲)، (۵) تکرار کنید. (ب) مسئلهٔ ۱۱-۴-۱۰ را با مراحل (۱)، (۳)، (۴)، (۵) تکرار کنید. (ج) مسئلهٔ ۱۱-۴-۱۰ را با مراحل (۱)، (۲)، (۴)، (۵) تکرار کنید.

□ **۱۱-۴-۱۲** طبق شکل ۱۱-۴-۹، فولادی بدون مولیبدن در $720^\circ C$ به حالت تعادل

# این علامت نشان می‌دهدکه در این مرحله از عملیات گرمایی قبل از آنکه به‌مرحلهٔ دیگر برویم تعادل حاصل می‌شود.

رسیده سپس تا $400^\circ C$ آب داده می‌شود و به‌مدت تقریباً ۵ ثانیه در آن‌دما می‌ماند تا تجزیهٔ $\gamma$ آغاز شود. اگر ۲۵ر۰٪ Mo موجود باشد چه‌مرحله‌ای لازم‌است تا حاصل‌عملیات گرمایی هردو فولاد یکسان شود؟ شرح دهید.

۱۱–۵–۱ قطعهٔ کوچکی‌از فولاد ۱۰۸۰، درحین آب‌دادن به‌مدت ۲۰ ثانیه دردمای $300^\circ C$ ($570^\circ F$) متوقف شده سپس تا $20^\circ C$ آب داده‌می‌شود. چه فازهایی موجود خواهندبود؟

جواب: M(۸ر۰٪C)، و مقداری $\gamma$(۸ر۰٪C) باقیمانده.

۱۱–۵–۲ فولاد ۱۰۴۵ در $825^\circ C$ ($1520^\circ F$) استنیتی شده، تا $670^\circ C$ ($1240^\circ F$) آب داده می‌شود، و قبل‌از آب‌دادن تا دمای متعارفی، یك دقیقه در $670^\circ C$ باقی می‌ماند. (الف) چه فاز(ها) ومیکروساختاری موجود خواهدبود؟ (ب) مسئله را برای فولاد ۴۳۴۰ تکرار کنید.

**۱۱–۵–۳** فولاد ۱۰۸۰ آب داده‌شده وتا سختی $50 R_C$ بازپخت شده است. (الف) دمای استنیتی‌شدن چقدر باید باشد؟ (ب) اگر دمای بازپخت $400^\circ C$ ($750^\circ F$) باشد چه‌مدتی باید آن‌را بازپخت کرد؟

جواب: (الف) $\sim 750^\circ C$ ($\sim 1380^\circ F$) (ب) $\sim 40$ min

۱۱–۵–۴ ساختارهای زیر را با هم مقایسه‌کنید: (الف) مارتنزیت و مارتنزیت بازپخت شده؛ (ب) مارتنزیت بازپخت‌شده و بینیت؛ (ج) بینیت و پرلیت‌کروی.

**۱۱–۵–۵** برای عملیات گرمایی‌زیرمنحنی‌دما (محورعمودی) و زمان (محور افقی)را رسم کنید. دماهای‌مهم، زمانهای‌مربوط به‌آن، ودلایل رسم‌منحنی‌را به‌صورتی‌که کشیده‌اید ذکر کنید. (الف) یکنواخت کردن‌فولاد ۱۰۹۵، درمقایسه‌با تابکاری همان فولاد. (ب)عملیات محلول سختی آلیاژ ۹۵Al–۵Cu درمقایسه‌با پیرسختی همان‌آلیاژ. (ج) بازپخت‌استنیتی فولاد ۱۰۸۰ درمقایسه با بازپخت مارتنزیتی (آب دادن منقطع) همان فولاد. (د) کروی کردن فولاد ۱۰۸۰ درمقایسه با کروی‌کردن فولاد ۱۰۵–۱۰.

**۱۱–۵–۶** با استفاده‌از داده‌های مثال ۱۰–۱–۳ و پیوست (ج)، برای فولاد ۱۰۸۰ تعیین کنیدکه آیا تغییرحجم برای بازپخت مارتنزیت ($M \rightarrow \alpha + \bar{C}$) بیشتر یا کمتر از تغییر حجم درمرحلهٔ آب‌دادن ($\gamma \rightarrow M$)است.

☐ **۱۱–۵–۷** میله‌ای از فولاد ۱۰۸۰ به‌قطر ۵۰ میلی‌متر آب داده شده و «پوسته‌ای» از مارتنزیت به‌ضخامت ۵ر۲میلی‌متر تشکیل داده‌است. درحالی‌که مرکز استنیتی داغ‌است، می‌تواند تغییرحجم را با ($\gamma \rightarrow M$) تطبیق دهد (مثال ۱۰–۱–۳). اگر مرکز آهسته‌تر سرد شود مستقیماً به($\alpha + \bar{C}$) تبدیل می‌شود. چه حلقهٔ تنشی روی پوستهٔ مارتنزیتی قرار می‌گیرد؟(برای ۱۰۸۰، $\rho_\gamma = 7.99 Mg/m^3 (= 7.99 g/cm^3)$؛ $\rho_M = 7.85 g/cm^3$؛ و $\rho_{(\alpha+\bar{C})} = 7.84 g/cm^3$.)

جواب: ۱۱۷۰MPa کشش

☐ **۱۱-۶-۱ سختی انتهای میلهٔ آزمایش آب دادن از فولاد AISI-SAE۲۰۲۰ چقدر است؟**

جواب: تقریباً ۴۹ $R_C$

☐ **۱۱-۶-۲ انتهای آب‌دادهٔ میلهٔ جامینی باید ۴۴ $R_C$ سختی داشته‌باشد. میزان کربن موجود درفولاد چقدر باید باشد؟ شرح دهید.**

☐ **۱۱-۶-۳ (الف) سرعت سردشدن، برحسب C/sec° در وسط شعاع میلهٔ استوانه‌ای به‌قطر ۵۰mm که در روغن به‌هم‌زده شده آب داده‌شده است چقدر است؟ (ب) مقدارآن برحسب فاصله از انتهای میلهٔ آب‌دادهٔ جامینی چقدراست؟**

جواب: (الف) ~۱۷°C/sec (ب) ۱۳mm

☐ **۱۱-۶-۴ مسئلهٔ ۱۱-۶-۳ را برای ۳/۴ شعاع و آب‌دادن در آب تکرار کنید.**

☐ **۱۱-۶-۵ (الف) میلهٔ استوانه‌ای از فولاد ۱۰۴۰ به‌قطر ۵۰mm در روغن به‌هم زده شده آب داده شده‌است، سختی دروسط شعاع آن چقدراست؟ (ب) درآب به‌هم زده شده چطور؟**

جواب: (الف) ۲۵$R_C$ (ب) ۲۸$R_C$

☐ **۱۱-۶-۶ مسئلهٔ ۱۱-۶-۵ را برای ۳/۴ شعاع تکرار کنید.**

☐ **۱۱-۶-۷ سختی مرکز میلهٔ استوانه‌ای ازفولاد ۱۰۴۰ به‌قطر ۵۰میلی‌متر در حالات زیر چقدر است؟ (الف) آب‌داده‌شده در روغن به‌هم زده شده. (ب) آب‌داده‌شده درآب به‌هم‌زده‌شده.**

جواب: (الف) ۲۴$R_C$ (ب) ۲۶$R_C$

☐ **۱۱-۶-۸ میل‌گردی ازفولاد ۱۰۴۰ درسطح ۴۱$R_C$ سختی و در مرکز ۲۸$R_C$ سختی دارد. سطح و مرکز میله با چه‌سرعتی از ۷۰۰°C سرد شده‌است؟**

☐ **۱۱-۶-۹ میل‌گردی‌ازفولاد ۱۰۴۰ به‌قطر ۶۳mm درروغن به‌هم‌زده‌شده آب‌داده‌می‌شود. سختی نقطه‌ای‌درفاصلهٔ ۲۵mm زیرسطح‌میل‌گرد رابرآوردکنید.(دلایل آن‌را بیان‌کنید.)**

جواب: ۲۴ $R_C$

☐ **۱۱-۶-۱۰ سختی‌عرضی فولاد ۱۰۴۰ که درشکل ۱۱-۶-۶ نشان داده‌شده‌است چگونه تغییر می‌کند؛ درصورتی‌که (الف) در روغن ساکن سرد شود؟ (ب) درآب ساکن سرد شود؟ (ج) اندازهٔ دانه‌های استنیت آن درشت‌تر باشد. شرح دهید.**

□ **۱۱-۶-۱۱** فولاد XX۴۰ پس از آنکه با سرعت ۱۷°C/sec سرد شده است، ۴۰$R_C$ سختی دارد. مقدار کربن آن چقدر است؟ اگر با دو برابر این سرعت آب داده‌شود سختی فولاد چقدر خواهدبود؟

جواب: (الف) ۰٫۵۵٪C (ب) ۴۰۵۰ در ۳۴°C/sec ($D_{qe}$=۷٫۵mm) ۵۳$R_C$

□ ۱۱-۶-۱۲ میله‌ای استوانه‌ای از فولاد ۴۳۴۰ به‌قطر ۸۰ میلی‌متر در روغن به‌هم زده شده، آب‌داده‌شده است. سختی عرضی‌را رسم کنید.

□ ۱۱-۶-۱۳ سختی عرضی را برای میله‌ای از فولاد ۱۰۶۰ (به‌قطر ۳۸ میلی‌متر) که (الف) در آب به‌هم‌زده‌شده آب‌داده‌شده، (ب) در روغن به‌هم‌زده‌شده، آب‌داده‌شده است رسم کنید. (عدد اندازهٔ دانه = ۲).

جواب: C:۳۷؛MR:۴۸ ؛S:۶۳$R_C$

۱۱-۶-۱۴ میله‌ای استوانه‌ای از فولاد ۱۰۴۰ (به‌قطر = ۴۰ میلی‌متر، و طول بیش‌از ۴۰ میلی‌متر) در آب به‌هم‌زده شده آب‌داده‌شده شده است. الف) سرعت سردشدن‌سطح میله از ۷۰۰°C چقدر است؟ سرعت سردشدن در مرکز میله چقدر است؟ (ب) سختی عرضی آن را رسم کنید.

□ **۱۱-۶-۱۵** سختی مرکز شش‌میله از یک‌نوع فولاد در زیر آمده‌است. بااستفاده ازاین داده‌ها، منحنی سختی‌پذیری را برای‌فولاد رسم کنید (راهنمایی: فقط یک‌منحنی باید وجود داشته‌باشد.)

| قطر | آب داده شده در آب | آب داده‌شده در روغن |
|---|---|---|
| ۲۵ میلی‌متر | ۵۸$R_C$ | ۵۷$R_C$ |
| ۵۰ میلی‌متر | ۵۵$R_C$ | ۴۷$R_C$ |
| ۱۰۰ میلی‌متر | ۳۴$R_C$ | ۳۰$R_C$ |

جواب: ۵۸$R_C$ در ۵mm=$D_{qe}$؛ ۵۶$R_C$ در ۱۰mm؛ ۴۹$R_C$ در ۱۵mm؛ ۳۹$R_C$ در ۲۰mm؛ ۳۳$R_C$ در ۲۵mm؛ ۳۱$R_C$ در ۳۰mm؛ ۳۰$R_C$ در ۳۵mm

□ **۱۱-۶-۱۶** سختی در وسط شعاع میله‌های مختلفی ازجنس یک‌نوع فولاد در زیر آمده است. بااستفاده ازاین داده‌ها، منحنی سختی‌پذیری فولاد را رسم کنید. (راهنمایی: فقط یک منحنی باید وجود داشته‌باشد.)

| قطر | آب داده‌شده در آب | آب داده شده در روغن |
|---|---|---|
| ۲۵ میلی‌متر | ۵۹$R_C$ | ۵۸$R_C$ |
| ۵۰ میلی‌متر | ۵۶$R_C$ | ۵۲$R_C$ |
| ۱۰۰ میلی‌متر | ۳۸$R_C$ | ۳۱$R_C$ |

☐ ۱۱-۶-۱۷ وسط چرخ دندهٔ باریکی $۴۵R_C$ سختی دارد. این چرخ دنده از فولاد ۴۰۶۸ ساخته‌شده که درشکل ۱۱-۶-۸ دیده می‌شود. اگر از فولاد ۱۰۴۰ ساخته شده بود سختی آن چقدر بود؟

جواب: $۲۴R_C$

☐ **۱۱-۶-۱۸** دو میلهٔ استوانه‌ای به‌قطر ۷۶mm یکی درآب به‌هم‌زده‌شده و دیگری در روغن به‌هم‌زده‌شده، آب داده‌شده‌است. سختیهای عرضی زیر به‌دست آمده‌است:

| فاصله ازسطح mm | آب، $R_C$ | روغن، $R_C$ |
|---|---|---|
| ۰ | ۵۷ | ۴۰ |
| ۹٫۵ | ۴۶ | ۳۳ |
| ۱۹ | ۳۶ | ۳۲ |
| ۲۸٫۵ | ۳۴ | ۳۱ |
| ۳۸ | ۳۳ | ۳۰ |

منحنی سختی‌پذیری به‌دست‌آمده از آزمایش آب دادن همین‌فولاد را محاسبه و رسم‌کنید (راهنمایی: فقط یک منحنی وجود خواهد داشت.)

☐ **۱۱-۶-۱۹** سختی سطح میل‌گردی ازفولاد ۱۰۴۰ که در روغن به‌هم‌زده‌شده آب‌داده شد $R_C$ ۴۰ است، سختی مرکز میلهٔ استوانه‌ای از فولاد ۴۰۶۸ که قطر آن دو برابر میلهٔ ۱۰۴۰ است و درآب، آب داده شده است را معین‌کنید. (تمام مراحل راه‌حل را نشان دهید.)

☐ **۱۱-۶-۲۰** میله‌ای فولادی به قطر ۴۰mm، ازفولاد ۴۰۱۷، کربن‌دهی شده تا کربن درسطح آن به‌۰٫۶۰٪ و در ۲میلی‌متری زیرسطح به‌۰٫۳۰٪ و در ۵میلی‌متری زیرسطح به ۰٫۱۷٪ رسیده‌است. تغییرات سختی میلهٔ فولادی را پس‌ازآب‌دادن در آب معین کنید.

۱۱-۶-۲۱ مثال ۱۱-۶-۵ را با آب‌دادن در روغن تکرار کنید.

جواب: (الف) $S:۳۳R_C$؛ $۲mm:\sim۲۸R_C$؛ $\frac{۳}{۴}R:۲۳R_C$؛ $MR:۲۲R_C$؛ $C:۲۱R_C$

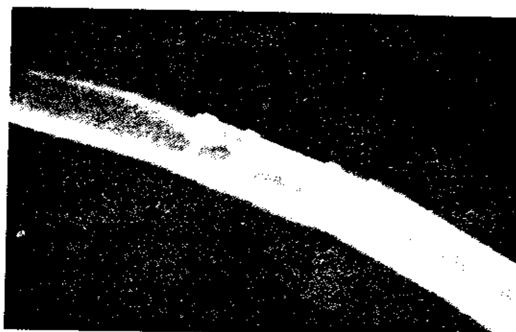
# ۱۲

## خوردگی فلزات

### چشم‌انداز فصل

می‌دانیم که خوردگی‌فلزات را ازبین می‌برد. اهمیت‌خوردگی را از آنجامی‌توان دریافت که درحدود ۵٪ درآمد سالانه کشورهای مترقی به‌طور مستقیم یاغیرمستقیم صرف‌نگهداری، تعمیر یا تعویض قطعات‌می‌شود. روشنترین نمونهٔ آن خوردگی در اتومبیل است بخصوص اگر روی جاده نمك پاشیده باشند. علاوه براین مسائل مهم دیگری نیز ایجاد می‌کند که از نگهداری پلها تا لوله‌کشی منازل و از قطعات فلزی که در بدن به‌کار می‌روند (شکل۱۲-۱-۱) تا کابلهای کشیده‌شده روی اقیانوس اطلس را دربر می‌گیرد.

اگر اتومبیل یا وسیلهٔ نقلیهٔ دیگری داریم و آن را در گاراژ نگهداری نمی‌کنیم، باید انتظارخوردگی آن را داشته باشیم. نمی‌توان با به‌کاربردن‌فلزاتی باکیفیت طلا از خوردگی جلوگیری کرد. زیرا برای ساختن اتومبیل موادی محکمتر، ارزانتر و فراوانتر لازم است. ولی اگر طراح فنی با علل خوردگی و روشهای کاهش آن آشنا شود میزان خوردگی را می‌تواند به‌حداقل برساند.



**شکل ۱۲-۱-۱** قطعات فلزی در بدن. این پیچها و ورق فلزی که برای ثابت نگه‌داشتن استخوان به‌کار رفته‌اند باید در محیط پیچیدهٔ بافتهای بدن در مقابل خوردگی مقاوم باشند، بی‌آنکه (۱) استحکام آنها کم‌شود و (۲) ذرات مضری وارد بدن سازند.

## هدف از مطالعه

**۰۱ یادآوری مطالب خوانده‌شده در شیمی به‌طوری که بتوانید محاسبات سادهٔ مربوط به‌جریانهای الکتریکی و خوردگی (یا آبکاری که «عکس‌خوردگی» است) را انجام دهید.**

**۰۲ درك اهمیت پتانسیل الکترود در غلظت استاندارد (۱ مولی)، و توانایی محاسبهٔ پتانسیل برای غلظتهای دیگر (معادلهٔ نرنست).**

**۰۳ افزایش اطلاعات شما در شیمی برای مطرح کردن واکنشهای کاتد و آند و در نهایت سلولهای گالوانی.**

**□ ۰۴ آشنا شدن با عواملی مثل قطبی‌کردن و اثر ناپذیرسازی که بر سرعت خوردگی اثر می‌گذارند.**

**۰۵ تشخیص راه‌حلهای مهندسی برای کاهش یا ازبین‌بردن خوردگی زیاد.**

## ۱۲-۱ آبکاری برقی: عکس خوردگی

این فرایند متداول عکس‌خوردگی است. یونهای فلزی هر کدام یك الکترون می‌گیرند و از الکترولیت جدا می‌شوند تا اتم فلزی M را تولید کنند



$$M^{n+} + ne^- \rightarrow M^\circ \qquad (۱۲-۱-۱)$$

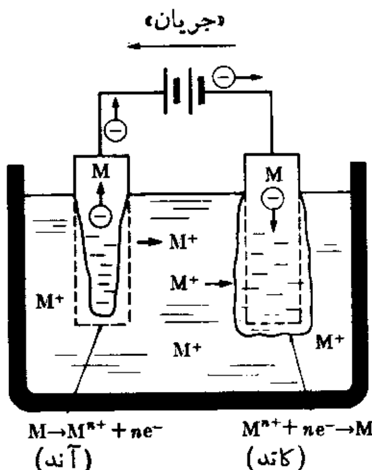
چون هرالکترون باری معادل $۰ر۱۶ \times ۱۰^{-۱۸}$ آمپر-ثانیه یا کولن حمل می‌کند، به‌سادگی می‌توان جریان لازم برای آبکاری فلز باسرعت معین را محاسبه کرد. هرمول ($۰ر۶۰۲۲ \times ۱۰^{۲۴}$) از یونهای یك ظرفیتی، ($۰ر۱۶۰۲ \times ۱۰^{-۱۸}$ کولن برالکترون) ($۰ر۶۰۲۲ \times ۱۰^{۲۴}$ الکترون) یعنی ۹۶۵۰۰ کولن نیاز دارد. این‌مقدار یك فاراده ($\mathcal{F}$) نامیده می‌شود. پس برای رسوب‌دادن ۱۰۷ر۸۷ گرم نقره از محلول $Ag^+$، باید جریان ۱ آمپر را به‌مدت ۹۶۵۰۰ ثانیه به‌کار برد (زمان و جریان می‌توانند تغییر کنند ولی حاصلضرب آنها باید ۹۶۵۰۰ آمپر-ثانیه باشد).

برای آبکاری برقی یك الکترولیت، دو الکترود و یك منبع الکترون لازم است. در عمل الکترونها به‌وسیلهٔ منبع جریان مستقیم به‌یکی از الکترودها داده می‌شوند. ولی در واقع الکترود دوم الکترون تولید می‌کند (شکل ۱۲-۱-۲). در این‌شکل الکترود سمت راست یعنی کاتد از یك مدار خارجی الکترون دریافت‌می‌کند*، واکنش (۱۲-۱-۱) انجام می‌شود و آبکاری صورت‌می‌گیرد. با ادامهٔ عمل، الکترود سمت‌چپ یا آند ازطریق باتری، که به‌عنوان «پمپ» عمل می‌کند، به مدار خارجی الکترون می‌فرستد. الکترونها از اتمهای فلزی الکترود سمت‌چپ جدا شده، اتمها اکسید می‌شوند و به‌تراز ظرفیتی بالاتر می‌رسند



$$M^\circ \rightarrow M^{n+} + ne^- \qquad (۱۲-۱-۲)$$

بدین‌ترتیب آند خورده می‌شود.




**شکل ۱۲-۱-۲** آبکاری برقی الکترونها ازطریق باتری به کاتد می‌روند و رسوب در آنجا تشکیل می‌شود (رابطهٔ ۱۲-۱-۱). با وجود این‌منبع نهایی الکترونها فلزی است‌که در آند قرار دارد و طبق رابطهٔ (۱۲-۱-۲) خورده می‌شود.

---

* این عبارات که به‌صورت ایرانیك نوشته شده‌اند درمورد آند و کاتد تمام مدارهای برقی صدق می‌کند، حتی در لامپهای تلویزیون که الکترودهایی دارندکه ازنظر شیمیایی خنثی هستند. در واکنشهای الکتروشیمیایی همیشه آند است‌که خورده می‌شود.

**مثال ۱۲-۱-۱** دریك فرایند آبکاری (مثل شکل ۱۲-۱-۲) در هرساعت باید ۱۰۰ گرم مس روی سطح ۲۵۰۰ $mm^2$ رسوب کند. الف) اگر بازده عمل کامل باشد چگالی جریان، $i$، چقدر است؟ ب) چقدر مس از آند خورده می‌شود؟

حل:

الف) $۰٫۰۰۰۶۳ = ۱۰۰g/[(۶۳٫۵۴g/\text{مول})(۲۵۰۰mm^2)] = \text{مول}/mm^2$

الکترونهای لازم $= (۰٫۰۰۰۶۳\ \text{مول}/mm^2)(۰٫۶ \times ۱۰^{۲۴}Cu^{++}/\text{مول})$

$\times (۲\ \text{الکترون}/Cu^{2+})$

$= ۷٫۵۵ \times ۱۰^{۲۰}\ \text{الکترون}/mm^2$

کولن لازم $= (۷٫۵۵ \times ۱۰^{۲۰}\ \text{الکترون}/mm^2)(۰٫۱۶ \times ۱۰^{-۱۸}coul/\text{الکترون})$

$= ۱۲۱\ coul/mm^2$

چگالی جریان $= (۱۲۱\ amp \cdot sec/mm^2)(۳۶۰۰\ sec)$

$= ۰٫۰۳۴\ amp/mm^2$

ب) همان مقدار مس (۱۰۰ گرم) از آند خورده‌شده و به‌صورت یون $Cu^{2+}$ در الکترولیت ظاهر می‌شود.

توضیح: معمولا بازده عمل آبکاری به‌علت واکنشهای‌جنبی، بیش‌از چنددرصد نیست، مثلا برخی الکترونها ممکن است با یونهای $H^+$ موجود در مجاورت آند، گاز $H_2$ تشکیل دهند. ▲

## ۱۲-۲ جفت گالوانی (پیل گالوانی)

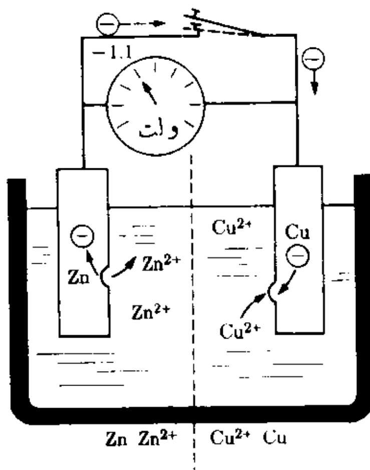
باوجود آنکه واکنش درآند (الکترود سمت چپ شکل ۱۲-۱-۲) خوردگی را نشان می‌دهد ولی این یك نمونه است زیرا باتری انجام می‌شود و در ضمن دوالکترود یکسان‌اند. درحالت عادی، خوردگی تحت شرایطی که دوالکترود مختلف باشند اتفاق می‌افتد، یعنی‌یك جفت گالوانی‌تشکیل می‌شود. برای توضیح این پدیده شکل (۱۲-۲-۱) را که درآن یك الکترود از روی و دیگری ازمس است درنظر بگیرید. هر دوفلز اکسید می‌شوند



$$Zn^{\circ} \rightarrow Zn^{2+} + 2e^- \qquad (۱۲-۲-۱)$$



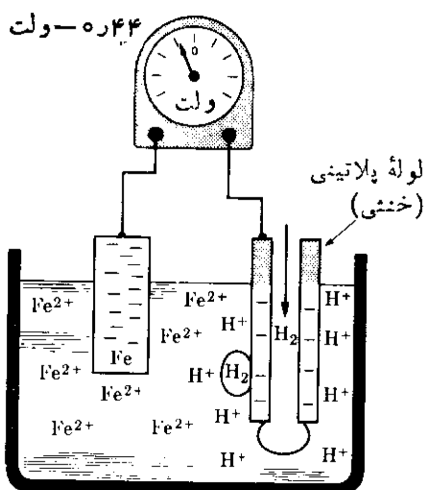
$$Cu^{\circ} \rightarrow Cu^{2+} + 2e^- \qquad (۱۲-۲-۲)$$




**شکل ۱۲-۲-۱** پیل گالوانی (Cu–Zn). با بسته‌شدن کلید، روی الکترونهایی ازطریق مدار خارجی به‌مس منتقل می‌کند. هنگامی که‌مدار بازباشد، اختلاف‌پتانسیل ۱ر۱ ولت به‌وجود می‌آید (جدول ۱۲-۲-۱، با محلولهای مولی).

همچنان‌که طول پیکانها نشان‌می‌دهد، واکنش روی درمقایسه با واکنش مس تمایل بیشتری برای حرکت به سمت‌راست دارد. بنابراین اگر دوفلز فقط با یك ولت‌سنج به‌هم متصل شوند، دستگاه اختلاف ولتاژی را نشان می‌دهد. اگر الکترولیت مورد استفادهٔ استاندارد (۱مولی) و دمای آن $25°C$ باشد، این اختلاف ۱ر۱ —ولت خواهد بود. این بدان‌معنی است که اگر ولت‌سنج درمدار فرعی‌قرارگیرد، الکترونها از الکترود روی به‌مدارخارجی جریان می‌یابند و مس این الکترونها را از مدار خارجی دریافت می‌کند. با جدا شدن الکترونها از آند، رابطهٔ (۱۲-۲-۱) به طرف راست می‌رود و روی بیشتری اکسید می‌شود. به‌عبارت دیگر روی خورده می‌شود. در این میان الکترونهایی که به‌کاتد می‌رسند بیش از الکترونهایی‌اندکه طبق رابطهٔ (۱۲-۲-۲) از آن جدا می‌شوند. این الکترونها با یونهای‌مس موجود درالکترولیت واکنش‌انجام می‌دهند ورابطهٔ(۱۲-۲-۲) معکوس می‌شود، تا رابطهٔ (۱۲-۱-۱) انجام گیرد. به‌این‌ترتیب خوردگی فقط دریکی از الکترودهای جفت گالوانی یعنی در آند اتفاق می‌افتد.

**پتانسیل الکترود.** تولید یون و الکترون در واکنشهایی مانند رابطهٔ (۱۲-۲-۱) پتانسیلی به‌وجود می‌آورد که پتانسیل الکترودی نامیده می‌شود و به‌دو عامل بستگی دارد: (۱) ماهیت فلز و (۲) ماهیت محلول. تمام فلزات به‌طور یکسان اکسید و به‌یون و الکترون تبدیل نمی‌شوند؛ دومعادلهٔ اول این بخش نشاندهندهٔ این اختلاف‌اند به‌علاوه، اتمهایی که در مرزدانه‌ها هستند نسبت به‌اتمهای شبکهٔ بلوری پایداری کمتری دارند (بخش ۴-۴)، و بنابراین راحت‌تر یونیده می‌شوند. همچنین اگر یونهای فلزی وارد محلولی شوند که در آن‌نسبتاً پایدارند، واکنش رابطهٔ (۱۲-۲-۱) باپتانسیل الکترود بیشتری به‌تعادل می‌رسد (مثلا یونهای مثبت روی درمحلول غلیظ $Cl^-$ پایدارترند تا در محلول رقیق $Cl^-$).




**شکل ۱۲-۲-۲** اختلاف پتانسیل بین Fe و $H_2$. آهن در مقایسه با $H_2$ پتانسیل الکترونی کمتری تولید می‌کند (جدول ۱۲-۲-۱ ستون وسط را با توجه به علائم الکتروشیمیایی ببینید). بنابراین آهن آند و هیدروژن کاتد است. (پلاتین عنصر کاتدی نیست زیرا یون $Pt^{4+}$ وجود ندارد که الکترون دریافت کند.)

پتانسیل الکترودی تمام فلزات (و بنابراین تمایل آنها به خوردگی) را با اندازه‌گیری اختلاف ولتاژ بین آن فلز و یک الکترود هیدروژن استاندارد تعیین می‌کنند. طبق روابط (۱۲-۱-۱) و (۱۲-۱-۲) واکنش الکتروشیمیایی آهن به‌صورت زیر است



$$Fe \rightleftharpoons Fe^{2+} + 2e^- \qquad (۱۲-۲-۳)$$

هیدروژن طبق واکنش زیر به تعادل می‌رسد



$$H_2 \rightleftharpoons 2H^+ + 2e^- \qquad (۱۲-۲-۴)$$

اختلاف پتانسیل بین الکترودهای آهن و هیدروژن ۴۴ر ه ولت است (شکل ۱۲-۲-۲).

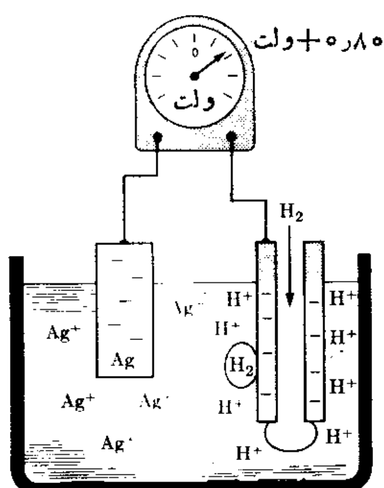
نتیجهٔ اندازه‌گیریهای مشابه برای فلزات دیگر در جدول ۱۲-۲-۱ آمده است. در فلزات قلیایی و قلیایی خاکی الکترونهای مدار آخر نسبتاً آزادند و اختلاف پتانسیل آنها نسبت به هیدروژن از آهن بیشتر است. بعکس فلزات نجیب مثل نقره، پلاتین و طلا در انتهای دیگر جدول پتانسیل الکتروشیمیایی قرار دارند (شکل ۱۲-۲-۳ و جدول ۱۲-۲-۱).

**پتانسیلهای الکترود (محلولهای رقیق).** معمولا با محلولهای یک‌مولی (جدول ۱۲-۲-۱) برخورد نمی‌کنیم، تقریباً همیشه الکترولیت رقیقتر است. اثر غلظت یون فلزی $C$ روی پتانسیل الکترونی $\mathcal{E}$ به‌راحتی توسط معادلهٔ نرنست محاسبه می‌شود، که در $25°C$ معمولا به‌صورت زیر نوشته می‌شود

**جدول ۱۲-۲-۱** پتانسیل الکترود (محلولهای ۱-مولی در $25°C$).

| پتانسیل الکترود که در «شیمی فیزیک» و ترمودینامیک به‌کار می‌رود.* (ولت) | | پتانسیل الکترود که در الکتروشیمی و مهندسی خوردگی به‌کار می‌رود.* (ولت) | واکنش نیم‌پیلی آند (برای واکنش نیم‌پیلی کاتد جهت پیکان عکس می‌شود) |
|---|---|---|---|
| −۱٫۵۰ | | +۱٫۵۰ | $Au \rightarrow Au^{3+} + 3e^-$ |
| −۱٫۲۳ | | +۱٫۲۳ | $2H_2O \rightarrow O_2 + 4H^+ + 4e^-$ |
| −۱٫۲۰ | ↑ | +۱٫۲۰ | $Pt \rightarrow Pt^{4+} + 4e^-$ |
| −۰٫۸۰ | کاتدی (نجیب) | +۰٫۸۰ | $Ag \rightarrow Ag^+ + e^-$ |
| −۰٫۷۷ | | +۰٫۷۷ | $Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+} + e^-$ |
| −۰٫۴۰ | | +۰٫۴۰ | $4(OH)^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^-$ |
| −۰٫۳۴ | | +۰٫۳۴ | $Cu \rightarrow Cu^{2+} + 2e^-$ |
| ۰٫۰۰۰ | مبنای مقایسه | ۰٫۰۰۰ | $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ |
| +۰٫۱۳ | | −۰٫۱۳ | $Pb \rightarrow Pb^{2+} + 2e^-$ |
| +۰٫۱۴ | | −۰٫۱۴ | $Sn \rightarrow Sn^{2} + 2e^-$ |
| +۰٫۲۵ | | −۰٫۲۵ | $Ni \rightarrow Ni^{2+} + 2e^-$ |
| +۰٫۴۴ | آندی (فعال) | −۰٫۴۴ | $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^-$ |
| +۰٫۷۴ | | −۰٫۷۴ | $Cr \rightarrow Cr^{2+} + 2e^-$ |
| +۰٫۷۶ | | −۰٫۷۶ | $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$ |
| +۱٫۶۶ | | −۱٫۶۶ | $Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^-$ |
| +۲٫۳۶ | | −۲٫۳۶ | $Mg \rightarrow Mg^{2+} + 2e^-$ |
| +۲٫۷۱ | ↓ | −۲٫۷۱ | $Na \rightarrow Na^+ + e^-$ |
| +۲٫۹۲ | | −۲٫۹۲ | $K \rightarrow K^+ + e^-$ |
| +۲٫۹۶ | | −۲٫۹۶ | $Li \rightarrow Li^+ + e^-$ |

*انتخاب علائم اختیاری است. از آنجا که موضوع موردبحث خوردگی است.ستون وسط را به‌کار خواهیم برد.




**شکل ۱۲-۲-۳** اختلاف پتانسیل بین $H_2$ و Ag. هیدروژن نسبت بـه‌نقره، پتانسیـل الکترونی کمتری تولید مـی‌کند (جـدول ۱۲ــ۲ــ۱، ستون وسط را بـا توجه به‌علائم الکتروشیمیایی‌ببینید.) و بنا براین‌هیدروژن آند و نقره کاتد است.

$$\mathcal{E}=\mathcal{E}_\circ+\left(\frac{0.0257\ \mathrm{V}}{n}\right)(\ln C). \qquad (۱۲ــ۲ــ۵، الف)^*$$

پتانسیل استاندارد ۱ـ مولی، $\mathcal{E}_\circ$، از جـدول ۱۲ــ۲ــ۱ به دست مـی‌آید. حرف $n$ تعداد الکترونهای از دست‌رفتهٔ هر یون است، مثلا در رابطهٔ (۱۲ــ۲ــ۱) برای $Zn^{2+}$، $n=2$ است. درمحلولهای‌رقیق، $C$ کمتر از یك‌مول در لیترو $\mathcal{E}<\mathcal{E}_\circ$ است، زیرا رابطهٔ(۱۲ــ۲ــ۵) طوری نوشته شده است که با علائم به‌کار رفته‌در محاسبات خوردگی (ستون وسط جدول ۱۲ــ۲ــ۱) مطابقت کند.

---

* معادلهٔ (۱۲ــ۲ــ۵، الف) از معادلهٔ شیمیایی زیر به‌دست می‌آید

$$\mathcal{E}=\mathcal{E}_\circ+\left(\frac{kT}{n}\right)\ln \mathcal{K} \qquad (۱۲ــ۲ــ۶، الف)$$

که درآن $k$ برابر با $8.61\times10^{-5}\mathrm{V/K}$، $T=298\ \mathrm{K}$، و $\mathcal{K}$ ثابت تعادل‌قانون جرم است. بنا براین می‌توان معادلهٔ (۱۲ــ۲ــ۵، الف) را به‌صورت زیر تبدیل کرد

$$\mathcal{E}=\mathcal{E}_\circ+\left(\frac{0.0257\mathrm{V}}{n}\right)\left(\frac{T}{298\mathrm{K}}\right)\ln C \qquad (۱۲ــ۲ــ۶، ب)$$

و بنابراین تغییر دما را درنظر گرفت.

برحسب لگاریتم مبنای ۱۰ معادلهٔ (۱۲ــ۲ــ۵، الف) به‌صورت‌زیر در می‌آید

$$\mathcal{E}=\mathcal{E}_\circ+\left(\frac{0.059\mathrm{V}}{n}\right)\log C \qquad (۱۲ــ۲ــ۵، ب)$$

**واکنشهای کاتدی.** در مورد خوردگی، مهمترین‌واکنشی کـه در آند انجام می‌شود رابطهٔ (۱۲ـ۱ـ۲) است، ولی انواع واکنشهای کاتدی بایـد موردتوجه قرارگیرند. زیرا هـر واکنش مصرف‌کنندهٔ الکترود (کاتـدی) همیشه بایك واکنش آنـدی خوردگی (واکنش تولیدکنندهٔ الکترون) همراه است. مهمترین واکنشهای کاتدی عبارت‌اند از



(۱۲ـ۱ـ۱) آبکاری برقی: $M^{n+} + ne^- \rightarrow M$



(۱۲ـ۲ـ۴) تولید هیدروژن: $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow$



(۱۲ـ۲ـ۷) تجزیهٔ آب: $2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2\uparrow + 2(OH)^-$



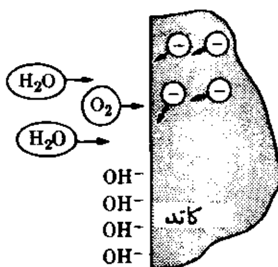
(۱۲ـ۲ـ۸) تشکیل هیدروکسیل: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4(OH)^-$



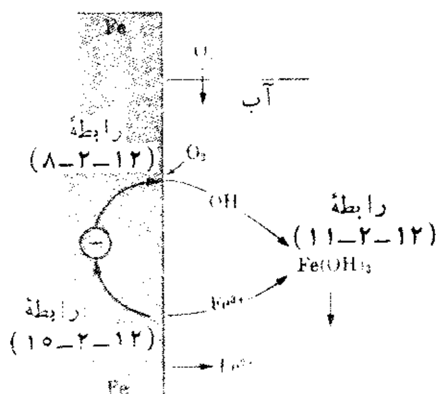
(۱۲ـ۲ـ۹) تشکیل آب: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

همهٔ واکنشها الکترون می‌گیرند. بسته به‌شرایط الکترولیت از قبیل غلظت و دمـا، یکی از این واکنشها غلبه خواهد کرد. واضح است که برای شروع نخستین واکنش از پنج واکنش فوق، یـونهای فلزی باید موجود باشند. به‌علاوه با زیاد شدن غلظت یون‌ـفلز، این یونها بیشتر الکترونها را در کاتد مصرف می‌کنند. این مطلب درمورد پیلهای غلظتی مورد توجه خواهد بود. واکنش (۱۲ـ۲ـ۹) به‌وجود اکسیژن و $pH$ کم (یعنی محلول‌اسیدی) احتیاج دارد. واکنش (۱۲ـ۲ـ۸) درصورت وجود اکسیژن، در محیطهای قلیایی یاخنثی بردیگران غلبه خواهد کرد (شکل ۱۲ـ۲ـ۴). این‌واکنش به‌هنگام بحث درمورد پیلهای اکسایشی حـائزاهمیت است. واکنش (۱۲ـ۲ـ۷) در شرایطی که اکسیژن آزاد وجـود نداشته باشد، و بخصوص درصورت وجود گوگرد یا دیگر موادگیرندهٔ هیدروژن به‌وقوع می‌پیوندد.

**زنگ.** شکل ۱۲ـ۲ـ۵ طرحوارهٔ مکانیسم زنگ‌زدن آهن را نشان‌می‌دهد. پتانسیل‌الکترود آهن $\phi$ مطابق جـدول (۱۲ـ۲ـ۱) وقتی $Fe^{2+}$ تشکیل دهد، برابر ۴۴ر۰ ـ ولت است (در واقع اگر بتواند الکترون بگیرد، بیشتر اکسید مـی‌شود و $Fe^{3+}$ تشکیل مـی‌شود).

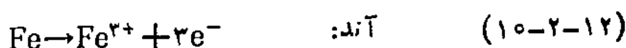



**شکل ۱۲ـ۲ـ۴** تشکیـل هیدروکسیل در کاتد. سرعت واکنش(۱۲ـ۲ـ۸) باافزایش مقدار اکسیژن بالا می‌رود. این عمل‌درکاتد که الکترونها جذب می‌شوند انجام می‌گیرد. اگر به‌وسیلهٔ یك جریان مستقیم عکس شده، الکترونها تخلیه می‌شوند، رابطهٔ ۱۲ـ۲ـ۸ عکس شده و اکسیژن آزاد می‌شود (مسئلهٔ ۱۲ـ۲ـ۴ را مطالعه کنید).

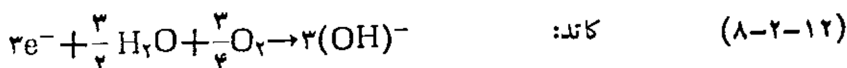



**شکل ۱۲-۲-۵** تشکیل زنگ. اکسایش آهن، الکترون و یون‌آهن تولید می‌کند که درکاتد با اکسیژن و آب ترکیب می‌شوند (رابطهٔ ۱۲ـ۲ـ۸) و یونهای $(OH)^-$ تشکیل می‌دهند. زنگ شامل ترکیبی از یونهای $(OH)^-$ و $Fe^{3+}$ است.

باتوجه به‌اینکه رابطهٔ (۱۲ـ۲ـ۸) کاتدی و الکترون گیرنده است، درآب پر اکسیژن واکنشهای زیر انجام می‌شود



$$Fe \rightarrow Fe^{3+} + 3e^- \qquad \text{آند:} \qquad (۱۲ـ۲ـ۱۰)$$



$$3e^- + \frac{3}{2} H_2O + \frac{3}{4} O_2 \rightarrow 3(OH)^- \qquad \text{کاتد:} \qquad (۱۲ـ۲ـ۸)$$



$$Fe^{3+} + 3(OH)^- \rightarrow Fe(OH)_3 \downarrow \qquad \text{رسوب:} \qquad (۱۲ـ۲ـ۱۱)$$

محصول نهایی هیدرات شکل، $Fe(OH)_3$، درآب نامحلول است و بنابراین رسوب می‌کند. این زنگ است که روی‌آهن در مجاورت هوا تشکیل می‌شود؛ برای تشکیل آن حتی همان لایهٔ رطوبت جذب شده به‌عنوان الکترولیت کافی است.

**مثال ۱۲-۲-۱** پیل استانداردی(۱-مولار، $25°C$) ساخته شده است که درآن واکنش آندی رابطهٔ (۱۲ـ۲ـ۱) و واکنش کاتدی رابطهٔ (۱۲ـ۲ـ۸) است. بین دو الکترود چه پتانسیلی به‌وجود می‌آید؟

حل: از جدول ۱۲ـ۲ـ۱ (که درآن $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e = 0.0\,V$)، دو واکنش آندی عبارت‌اند از



$$Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^- \qquad \mathcal{E}_0 = -0.76\,V \qquad (۱۲ـ۲ـ۱)$$



$$4(OH)^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^- \qquad \mathcal{E}_0 = +0.40\,V \qquad (۱۲ـ۲ـ۸)$$

$$\text{اختلاف} = -1.16\,V$$

توضیح. از آنجاکه رابطهٔ (۱۲ـ۲ـ۸) در جدول (۱۲ـ۲ـ۱) بالای رابطهٔ (۱۲ـ۲ـ۱) قرار دارد، واکنش مربوط به‌کاتد می‌شود؛ وجهت آن‌عکس‌شده‌و به‌واکنش گیرندهٔ الکترون تبدیل می‌شود.

▲

**مثال ۱۲-۲-۲** پتانسیل الکترود کرم (نسبت به هیدروژن) را در محلولی که در هر لیتر حاوی ۲ گرم یون $Cr^{2+}$ است، تعیین کنید.

حل: ازآنجاکه وزن اتمی کرم ۵۲ گرم است

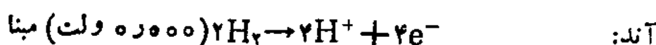
$$C=\frac{2\ g/l}{52 g/mole}=0.0385\,M$$

$$\mathcal{E}=-0.74V+\frac{0.0257V}{2}(\ln 0.0385)$$

$$=-0.78\,V$$ ▲

**مثال ۱۲-۲-۳** توضیح دهید که با استفاده از هیدروژن و اکسیژن چگونه می‌توان یک پیل سوختی را به‌کار انداخت.

حل: الکترونها باید از هیدروژن جداشده و از طریق مدار خارجی برگردند تا با اکسیژن ترکیب شوند. واکنشهای نیم‌پیلی عبارت‌اند از



آند: $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$ (۰٫۰۰۰ ولت) مبنا



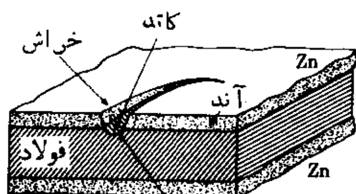
کاتد: $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$ (۱٫۲۳ ولت)

بنابراین باوجود الکترولیت ۱- مولار استاندارد، از نظر تئوری، باید پیل ۱٫۲۳ ولتی تشکیل شود. برای این‌کار الکترودها باید رسانا، ازنظر شیمیایی بی‌اثر، و متخلخل باشند تا گاز را بتوان درآنها تغذیه کرد. ▲

## ۱۲-۳ انواع پیلهای گالوانی

پیلهای خوردگی گالوانی را می‌توان به سه گروه مختلف تقسیم کرد: (۱) پیلهای ترکیبی، (۲) پیلهای تنشی، و (۳) پیلهای غلظتی. هر کدام از این‌پیلها خوردگی ایجاد می‌کنند زیرا یک‌نیمه ازجفت تشکیل شده به‌عنوان آند و نیمهٔ دیگر به‌عنوان کاتد عمل خواهدکرد. فقط آند خورده می‌شود وآن‌هم درصورتی است که باکاتد اتصال الکتریکی داشته باشد. اگر فقط آند وجود داشته‌باشد، به‌سرعت بامحیط‌موجود به‌تعادل می‌رسد (رابطهٔ ۱۲-۲-۳ را که درآن فقط آهن موجود است ببینید).

**پیلهای ترکیبی.** بین هردو مادهٔ متفاوت ممکن است پیل ترکیبی به‌وجودآید. درهر حال، فلزی که در مجموعهٔ محرکهٔ الکتریکی، مطابق آنچه در جدول ۱۲-۲-۱ آمده است، پایینتر قرار دارد به‌عنوان آند عمل‌خواهدکرد. مثلا در ورق فولاد روی‌اندودکاری شده (شکل ۱۲-۳-۱)، روکش روی حتی اگر سطح آهن را به‌طور کامل نپوشاند به‌عنوان آند عمل



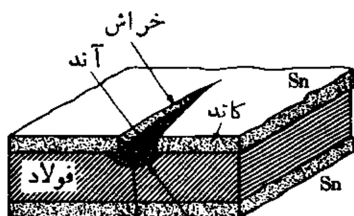

**شکل ۱۲-۳-۱** فولاد روینه کاری‌شده (سطح مقطع). روی به‌عنوان آند و آهن موجود در فولاد به‌عنوان کاتد عمل می‌کند. بنابراین‌حتی در نقاطی‌که روی خراشیده‌شده است، آهن محافظت می‌شود.

وآهن زیر آن‌را محافظت می‌کند، زیرا آهن نقش‌کاتد را دارد و خورده‌نمی‌شود. بنابراین هرنوع خوردگی در آند یعنی سطح رویی اتفاق می‌افتد. مادام‌که روی وجود دارد آهن مجاور را محافظت می‌کند.

برعکس اگر قلع به‌عنوان روکش برای ورقهای فولادی یا آهنی به‌کار رود، فقط تا زمانی از خوردگی جلوگیری می‌شود که سطح فلز کاملا پوشانده شده باشد. ولی اگر در روکش شیاری پدیدآید، قلع نسبت به‌آهن‌کاتد وآهن آند می‌شود (شکل ۱۲-۳-۲). جفت‌گالوانی حاصل موجب خوردگی‌آهن می‌شود. ازآنجاکه آندی باسطح کوچك باید به‌کاتدی باسطح وسیع الکترون بدهد، خوردگی موضعی و بسیار سریع خواهد بود.

نمونه‌های دیگری از جفت‌گالوانی که اغلب باآن برخورد می‌کنیم عبارت‌اند از: (۱) پیچهای فولادی در قطعات برنجی کشتی، (۲) لحیم «Pb-Sn» اطراف سیم مسی، (۳) محور فولادی پروانه در یاتاقانهای مفرغی، و (۴) لولهٔ فولادی‌که در لوله‌کشی به‌لولهٔ مسی متصل می‌شود. هریك از اینها می‌تواند پیل گالوانی باشد و باید از محیط خورنده حفظ شود. بسیاری از مهندسان تشخیص نمی‌دهند که محل اتصال دوفلز مختلف منبع بالقوه برای خوردگی گالوانی است. اخیراً در یك‌مورد مهم، از یاتاقان برنجی در مکانیسم همزن هیدرولیکی فولادی استفاده شده بود، و باوجود آنکه محیط روغن بود فولادبه‌عنوان آندعمل‌کرده به‌قدری‌خورده شده‌بودکه ازمیان اتصالات روغن‌نشت می‌کرد.

پیلهای گالوانی می‌توانند ابعاد میکروسکوپی داشته باشند. زیرا هرفاز ترکیب و ساختار خود را دارد بنابراین هریك دارای پتانسیل الکترود ویژه‌ای است درنتیجه اگر آلیاژ دوفاز در معرض الکترولیت قرار گیرد، پیل گالوانی به‌وجود خواهد آمد. مثلا در پرلیت‌شکل ۹-۸-۱ لایه‌های‌کاربید به‌این‌دلیل مشخص‌می‌شوند که کاربید در الکترولیتی



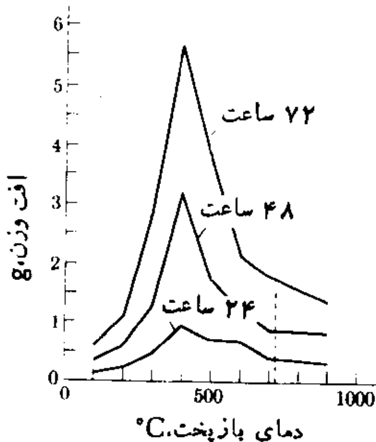

**شکل ۱۲-۳-۲** حلبی (سطح مقطع). قلع فقط درصورتی آهن را محافظت می‌کند که کاملاسطح آن را پوشانده‌باشد. هرگاه‌روکش بشکند آهن موجود در فولاد به‌عنوان آند عمل می‌کند و سریعاً خورده می‌شود.



**شکل ۱۲-۳-۳** میکروپیلهای گالوانی (آلیاژ Al-Si). آلیاژهای دوفازی بیشتر از آلیاژ تک‌فاز در معرض خوردگی قرار می‌گیرند. آلیاژ دوفازی آند و کاتد تشکیل می‌دهد.

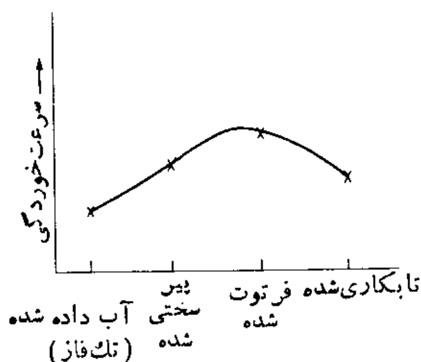
که به‌عنوان محلول حک‌کاری به‌کار می‌رود به‌عنوان آند عمل می‌کند.* شکل ۱۲-۳-۳ میکروساختار آلیاژ ریختگی «Al-Si» را نشان‌می‌دهد. در اینجا نیز مشخص‌شدن دوفاز به‌خوردگی بستگی دارد. یکی از فازها آند و دیگری کاتد است.

عملیات گرمایی می‌تواند با تغییرمیکروساختار فلز، برسرعت‌خوردگی اثر بگذارد. شکل ۱۲-۳-۴ اثر بازپخت را روی خوردگی فولاد آب داده شده نشان می‌دهد. قبل‌از واکنشهای بازپخت، فولاد شامل تک‌فاز مارتنزیت است. بازپخت مارتنزیت تعداد زیادی پیل‌گالوانی و مرز دانه‌های فریت وکاربید تولید می‌کند و سرعت‌خوردگی را افزایش می‌دهد. دردماهای بالاتر، به‌هم‌پیوستن ذرات کاربید تعداد پیلهای گالوانی و تعداد




**شکل ۱۲-۳-۴** میکروپیلهاوخوردگی. پس از آبدادن فقط مارتنزیت وجود دارد. پس از بازپخت در دماهای متوسط به‌دلیل وجود ساختار ریز (کاربید+α) تعداد زیادی پیل گالوانی کوچك وجود خواهد داشت. با بازپخت در دماهای بالا، ذرات کاربید انباشته شده و تعداد پیلهای گالوانی کم می‌شود.

* محلول‌حک‌کاری پیکرال ۴٪ بوده‌است. کاربیدها تیره می‌شوند زیرا موادحاصل از واکنش در سطح باقی می‌مانند. پتانسیل‌الکترود فریت و کاربید آنقدر به‌هم نزدیك است که اگر در الکترولیتهای دیگری قرارگیرند، نقش کاتدی و آندی آنها ممکن است باهم عوض شود.



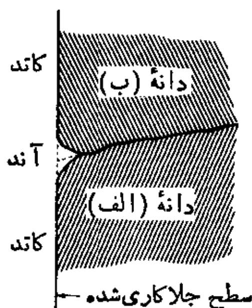

**شکل ۱۲-۳-۵** پیرسختی و خوردگی (طرحواره). در آلیاژ آب داده شدهٔ تک فاز سرعت خوردگی کمتر از مراحل دو فازی بعدی است.

مرزدانه‌ها را کم می‌کند و بدین‌ترتیب سرعت‌خوردگی به‌طور قابل‌توجهی کم می‌شود.

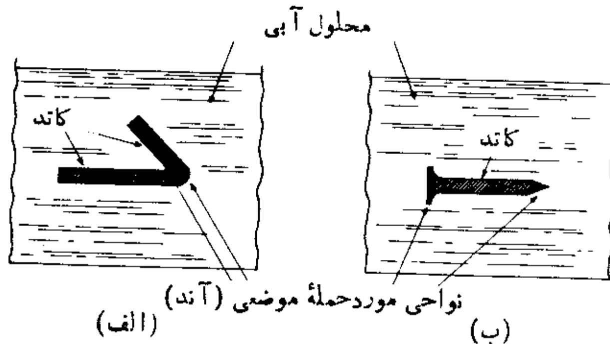
در آلیاژ تک‌فاز آلومینیم که قابلیت پیرسختی دارد، سرعت خوردگی کم است (شکل ۱۲-۳-۵)، ولی هنگامی که فاز دوم رسوب می‌کند، سرعت خوردگی به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. انباشتگی بیشتر رسوب بار دیگر سرعت خوردگی را کمتر می‌کند ولی این سرعت هیچگاه به‌کمی سرعت خوردگی در آلیاژ تک‌فاز نمی‌رسد. آلیاژ فرتوت شده دارای بیشینهٔ سرعت خوردگی است.

**پیلهای تنشی.** همان‌طورکه درشکل ۴-۴-۹ دیده می‌شود وقتی مرزدانه‌ها حک‌کاری (یعنی خورده) می‌شوند، پتانسیل الکترود اتمهای مرزدانه‌ها با اتمهای دانه‌ها فرق دارد بنابراین آند و کاتد به‌وجود می‌آید (شکل ۱۲-۳-۶). مرزدانه‌ها را می‌توان نواحی تحت‌تنش به‌شمارآورد زیرا اتمها در موقعیتی نیستند که کمترین انرژی را داشته باشند.

اثر تنشهای‌داخلی روی‌خوردگی، پس‌ازسردکاری فلز نیزمعلوم است. شکل ۱۲-۳-۷ (الف) نمونهٔ بسیارساده‌ای را نشان می‌دهد که‌درمحل خم‌شدهٔ میله‌ای که قبلا تابکاری شده کرنش سختی‌وجود دارد. ناحیه‌ای که شدیداً سردکاری شده به‌عنوان آند و سایرنواحی




**شکل ۱۲-۳-۶** خوردگی‌مرزدانه‌ای. چون اتمهای مرزدانه‌ها انرژی بیشتری دارند، مرزدانه‌ها به‌عنوان آند عمل می‌کنند. (به شکل ۴-۴-۹ رجوع کنید.)




**شکل ۱۲-۳-۷** پیل تنشی. در این دونمونهٔ کرنش‌سختی، نواحیی که بیشتر سردکاری شده‌اند آندند. پتانسیل الکترود فلز تغییرشکل یافته بیشتر ازفلز نابکاری شده است.

تغییر نیافته به‌عنوان کاتد عمل می‌کنند.*

اثرات تنش روی خوردگی در مهندسی اهمیت بسیاری دارد. اگر قطعه‌ای در محیط خورنده‌ای به‌کار می‌رود، وجود تنش می‌تواند سرعت خوردگی را تا حد زیادی افزایش دهد.

**پیلهای غلظتی.** طبق معادلهٔ نرنست (۱۲-۲-۵)، هر الکترود در الکترولیت رقیق نسبت به‌همان الکترود در الکترولیت غلیظ، آندی است. این موضوع را می‌توان بااستفاده از شکل ۱۲-۳-۸ و رابطهٔ (۱۲-۳-۱) نشان داد



$$Cu^{\circ} \underset{\text{غلیظ}}{\overset{\text{رقیق}}{\rightleftharpoons}} Cu^{2+} + 2e^{-} \qquad (۱۲-۳-۱)$$

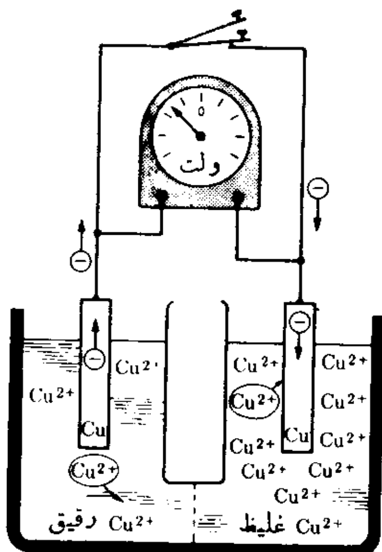
فلز طرف (د) شکل در محلول رقیقتر $Cu^{2+}$ قرار دارد بنابراین واکنش (۱۲-۳-۱) به‌راحتی به‌طرف راست انجام می‌شود. فلز طرف(ج) در محلولی باغلظت بیشتر $Cu^{2+}$ قرار دارد بنابراین واکنش (۱۲-۳-۱) مس را ساده‌تر روی الکترود پوشش می‌دهد، الکترودی که درالکترولیت غلیظ قرار داردکاتدشده محافظت می‌شود، حال آنکه الکترود در الکترولیت رقیق بیشتر خورده شده آند می‌شود.

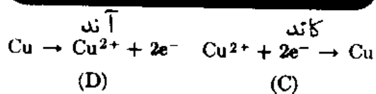
پیل غلظتی در جایی که غلظت الکترولیت کمتر است خوردگی را تشدید می‌کند.

پیلهای غلظتی ازنوع بالا غالباً در واحدهای شیمیایی ونیز تحت برخی شرایط مربوط

---

* کتاب خوردگی درعمل که توسط شرکت بین‌المللی نیکل چاپ شده‌است اثر کارسرد را روی خوردگی گالوانی نشان می‌دهد (با آزمایشات توضیحی).




**شکل ۱۲-۳-۸** پیل غلظتی. اگر الکترولیت همگن نباشد، ناحیهٔ رقیقتر آند می‌شود.

به‌خوردگی ناشی از جریان سیال یافت می‌شوند. ولی به‌طور کلی اینها کم‌اهمیت‌تر و غیرمعمولتر از نوع اکسایشی پیل غلظتی‌اند. وقتی سطح مرطوب فلزی در معرض اکسیژن موجود در هوا قرار می‌گیرد خوردگی تشدید می‌شود. با این حال خوردگی بیشتر در قسمتی از پیل که کمبود اکسیژن دارد رخ می‌دهد.

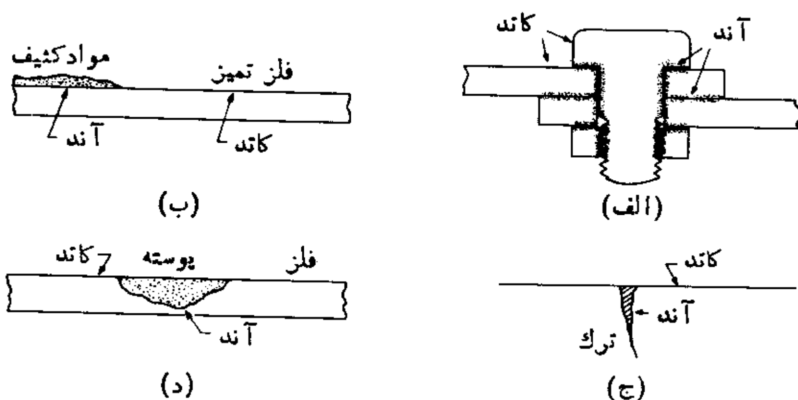
این امر غیرعادی را می‌توان براساس واکنشهای در سطح کاتد، یعنی جایی که الکترونها به‌مصرف می‌رسند، شرح داد. رابطهٔ (۱۲-۲-۸) بار دیگر در اینجا آمده است، زیرا نقش $O_۲$ را در تشدید خوردگی در نواحی بدون اکسیژن نشان می‌دهد.



$$۲H_۲O + O_۲ + ۴e^- \rightleftharpoons ۴(OH)^-$$

از آنجا که این واکنش کاتدی محتاج به‌اکسیژن، الکترونها را از فلز جدا می‌کند، نواحی مجاور که اکسیژن کمتری دارند، باید الکترونهای بیشتری تولید کنند، پس نواحی کم اکسیژن به‌عنوان آند عمل می‌کنند.

پیل اکسایشی در محلی که غلظت اکسیژن کمتر است خوردگی را تشدید می‌کند. این مطلب کلی مهم است. خوردگی در محلهایی که ظاهراً در دسترس نیستند مثل ترکها یا شکافها و زیر توده‌های مواد کثیف و سایر آلودگیهای سطحی تشدید می‌شود (شکل ۱۲-۳-۹). زیرا محلهایی که کمبود اکسیژن دارند به‌عنوان آند عمل می‌کنند و در این مورد خوردگی خود به‌خود تسریع می‌شود زیرا جمع‌شدن زنگ یا مواد کثیف




**شکل ۱۲-۳-۹** پیل اکسایشی. محلهایی‌که در دسترس‌نیستند وغلظت اکسیژن در آنها کم‌است به‌عنوان آند عمل‌می‌کنند، زیرا تحرك الکترونها و یونهای فلزی، ازاکسیژن بیشتر است.

دسترسی اکسیژن به‌فلز را محدود کرده آند به‌وجود می‌آورد و تجمع این مواد بازهم بیشتر می‌شود. نتیجهٔ این عمل حفره‌ای شدن موضعی به‌دلیل خوردگی غیریکنواخت است [شکل ۱۲-۳-۹ (د)] و عمر مفید قطعه، را بیش‌از آنچه کاهش وزن نشان می‌دهد کم می‌کند.

**مثال ۱۲-۳-۱** در دوسر یك‌سیم‌مسی، غلظت‌مس در الکترولیت ۰٫۰۳M و ۰٫۰۰۲M است. الف) چه‌پتانسیل الکترودی بین دوسر آن به‌وجود می‌آید؟ ب) کدام سر آن‌خورده می‌شود؟

حل:

الف) $\mathcal{E}_{۰٫۰۳} = +۰٫۳۴\,\text{V} + \frac{۰٫۰۲۵۷}{۲}(\ln ۰٫۰۳) = ۰٫۲۹۵\,\text{V}$

$$\mathcal{E}_{۰٫۰۰۲} = +۰٫۳۴\,\text{V} + \frac{۰٫۰۲۵۷}{۲}(\ln ۰٫۰۰۲) = ۰٫۲۶۰\,\text{V}$$

$$\Delta = ۳۵\,\text{mV}$$

ب) آند در سری است که الکترولیت آن رقیقتر است. ▲

## □ ۱۲-۴ سرعت خوردگی

بابررسی جدول ۱۲-۲-۱ پرسشهایی‌مطرح می‌شود. مثلا آلومینیم آندیتر از آهن است،

پس چرا کمتر از آهن خورده می‌شود؟ با آنکه کرم با ۳ر۰ ولت اختلاف نجیبتر از آهن است، چگونه مقاومت فولادهای زنگ‌نزن‌را در برابر خوردگی زیاد می‌کند؟ برای‌پاسخ دادن به چنین پرسشهایی باید عواملی‌که برچگالی جریان مؤثرند را بررسی کرد.

**چگالی‌جریان.** درمدار بازبین آند آهنی وکاتد هیدروژنی (شکل ۱۲ــ۲ــ۲) درشرایط استاندارد (جدول ۱۲ــ۲ــ۲) اختلاف‌پتانسیل‌الکترود ۴۴ر۰ــ است. در واقع‌یك‌باتری داریم و اگر دوالکترود در مداری بههم متصل شوند، جریان ایجاد می‌شود. واضح است که اگر اتصال صورت گیرد، اختلاف پتانسیل کاهش می‌یابد.

شکل ۱۲ــ۴ــ۱ صورت دیگری از شکل ۱۲ــ۲ــ۲ است، با این تفاوت‌که دراینجا مقاومت متغیر و لوله‌ای آهنی برای ایجاد کاتدهیدروژنی وجود دارد. آزمایش نشان می‌دهد کـه اگر اتصال مستقیمی بین دوالکترود ایجاد شود ($R=0$) چگالی جریان، $i$، روی الکترودها برابر ۲ آمپر برمترمربع می‌شودکه مساوی‌باجریان $I$ (که توسط آمپرسنج خوانده مـی‌شود) بر واحـد سطح است. این مقدار چگالی جریان خوردگی، $i_{co}$، نامیده می‌شود. البته اختلاف پتانسیل، $\Delta\phi$، بین دوالکترود بااتصال مستقیم صفر ولت مـی‌شود. با افزایش‌مقاومت، اختلاف‌پتانسیل افزایش‌می‌یابد و مطابق شکل ۱۲ــ۲ــ۲ در $R=\infty$ به $\Delta\phi = -0{,}44\,V$ می‌رسد.

برای نشان دادن ارتباط بین چگالی جریان و اختلاف پتانسیل از شکل ۱۲ــ۴ــ۲ استفاده‌می‌شود. اگرچه می‌توان آن‌را به‌صورت‌رابطهٔ ریاضی نیز نشان داد،* ولی توجه ما روی دومنحنی متمرکز خواهد شد. منحنی $C$ برای کاتد و منحنی $A$ برای آند است. منحنیها معمولا به‌صورت خطوط مستقیم یکدیگر را در $2\ amp/m^2$ قطع می‌کنند (البته برای دوالکترود هیدروژن‌وآهن وتحت‌شرایط استاندارد). در $\Delta\phi = 0{,}2\ V$ (نقطه‌هایی که درشکل (۱۲ــ۴ــ۲ دیده می‌شوند)، چگالی جریان تا ۱ر۰ آمپر برمترمربع کـاهش می‌یابد.

البته در مورد جفتهای دیگر وضعیت فرق می‌کند. مثلا منحنی $A$ برای روی به‌طور محسوسی‌زیرمنحنی $A$ برای آهن‌قرار دارد. درنتیجه اگر درشکل ۱۲ــ۴ــ۱ به‌جای‌آهن، روی ($Zn-H_2$) قرار گیرد، چگالی‌جریان‌خوردگی، $i_{co} = \sim 10^{5}\ amp/m^2$ برای

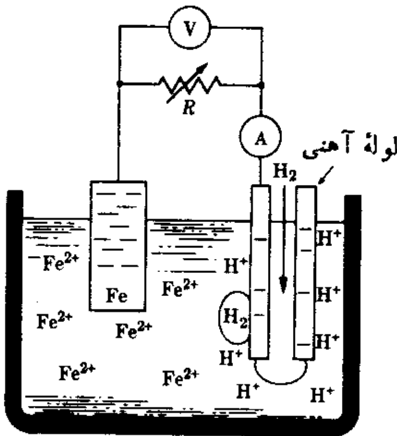
---

* چگالی جریان $i$ طبق رابطهٔ زیر تغییر می‌کند

$$i = i_0 e^{\phi/B} \qquad \text{(۱۲ــ۴ــ۱، الف)}$$

که درآن $i$ چگالی جریان تغییریافته، $\phi$ پتانسیل اضافی، و $B$ ثابت تـافل است (به‌کتابهای خوردگی مراجعه‌کنید). به‌عبارت دیگر

$$\ln i = C + \frac{\phi}{B} \qquad \text{(۱۲ــ۴ــ۲، ب)}$$




**شکل ۱۲-۴-۱** اندازه‌گیری چگالی جریان (طرحوار) اگر اتصال مستقیم باشد ($R = ۰$ و بنابراین $Δφ = ۰$)، چگالی جریان خوردگی، $i_{co}$ به‌وجود می‌آید. برای این جفت، این چگالی برابر ۲ آمپر برمترمربع است. اگر مقاومت برای $Δφ = ۰٫۲V$ تنظیم شود، (شکل ۱۲-۴-۲) چگالی تا ۰٫۱ آمپر برمترمربع کاهش می‌یابد.

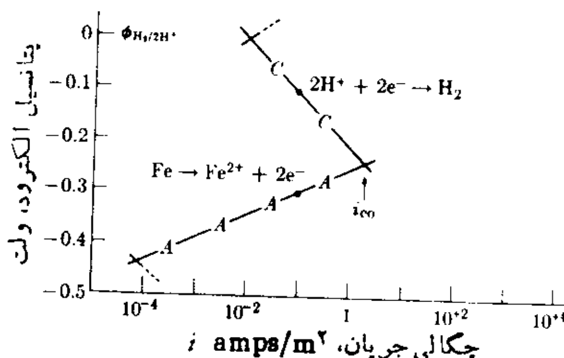
$i_{co}$، خیلی بیشتر خواهد بود. به‌طور کلی اگر اختلاف پتانسیل الکترود مدار باز آند و کاتد بیشتر باشد، منحنیهای آنها یکدیگر را در چگالی جریان بالاتری قطع می‌کنند. بنابراین، با استفاده از جدول ۱۲-۲-۱، انتظار داریم که چگالی جریان برای جفت آهن/مس $[Δφ = -۰٫۴۴V - (+۰٫۳۴ V)]$ بیشتر از چگالی جریان برای جفت آهن/هیدروژن $[Δφ = -۰٫۴۴V - ۰]$ یا پیل گالوانی آهن/نیکل

$$[Δφ = -۰٫۴۴V - (-۰٫۲۵ V)]$$

باشد.

در بحثهای بالا فرض شده است که آند و کاتد سطوح مساوی دارند. از آنجاکه مساحت آند و کاتد به‌ندرت باهم مساوی است، چگالی جریان، $i$، بیشتری روی الکترودی که سطح کمتری دارد مشاهده می‌شود. (کل جریان $I$، باید برای هردو الکترود یکی باشد، زیرا بار الکتریکی ذخیره نمی‌کنیم.) درصورتی که الکترود کوچکتر آند باشد، خوردگی تا حد قابل ملاحظه‌ای تشدید می‌شود. پیچی فولادی را درنظر بگیرید که برخلاف مصلحت، در قطعات برنجی کشتی به‌کار رفته است یا شکاف شکل ۱۲-۳-۲ را که در «حلبی» به‌وجود آمده است. در هر دوصورت کل تعداد الکترونهای جریان خوردگی باید با خورده‌شدن فلز در سطح آند کوچك به‌وجود آید، بنابراین سرعت خوردگی در آن نقطه بسیار زیاد خواهد بود. خوردگی در ورق فولادی شکل ۱۲-۳-۲ بسیار سریع نفوذ می‌کند؛ همچنین پیچ فولادی به‌کار رفته در قطعهٔ برنجی وقتی در آب دریا قرار گیرد در زمان کوتاهی از بین می‌رود.

**قطبش کاتدی.** هنگام پیش‌بینی جریان خوردگی از شکل (۱۲-۴-۲) می‌توان فرض کرد که سرعت یونهایی که الکترود را ترك می‌کنند یا به‌آن نزدیك می‌شوند چنان است که برای به‌وجود آوردن این جریان خوردگی کافی است. این فرض در مورد آند که در

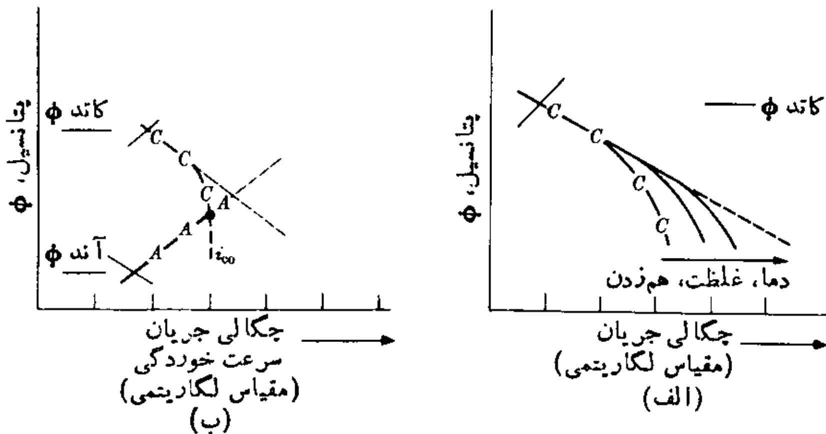



**شکل ۱۲-۴-۲** چگالی جریان برحسب اختلاف پتانسیل (به‌شکل ۱۲-۴-۱ رجوع شود). وقتی آند و کاتد شکل (۱۲-۴-۱) در تماس مستقیم باشند، جریان خوردگی، $i_{co}$ برابر با ۲ آمپر بر $m^2$ است. با زیادشدن اختلاف پتانسیل بین آند $A$ و کاتد $C$، چگالی جریان کاهش می‌یابد. (وقتی اختلاف پتانسیل ۲ر۰ ولت ($A = -$ ۳ر۰ V و $C = -$ ۱ر۰ V) باشد چگالی جریان فقط ۱ر۰ amp/m² است.)

آن یونهای جدا شده وارد الکترولیت رقیق می‌شوند کاملا بجاست (و این‌حالت متداول خوردگی است). ولی یونهای $H^+$، $O_2$ حل‌شده، یا دیگر مواد واکنشگر رقیق می‌توانند به‌آسانی ناحیهٔ کاتدی را تخلیه‌کرده و سبب تأخیر نفوذی شوند. این حالت قطبش کاتدی نامیده می‌شود و بااصلاح منحنی کاتد، $C$، شکل ۱۲-۴-۲، می‌توان آن را طبق شکل ۱۲-۴-۳ توصیف کرد. در محلولهای راکد با دمای پایین، یا غلظت‌کم مواد واکنشگر دائماً در دسترس‌نیستند تا الکترون جذب‌کنند وچگالی‌جریان از مقدار پیش‌بینی‌شده روی منحنی کاتد عقب می‌افتد. درنتیجه چگالی جریان خوردگی در تقاطع دومنحنی کمتراز مقدار پیش‌بینی شده است. چون در این‌حالت خوردگی آهسته‌تر است می‌خواهیم چنین حالتی به‌وجودآید.* در نیروگاههای بخار این کار با هواگیری آب تغذیه شده انجام می‌شود. اما در وضعیتی که درشکل ۱۲-۲(الف) دیده‌می‌شود، به‌مشکلی بر می‌خوریم زیرا در حالت راکد خوردگی می‌تواند قابل‌اغماض باشد؛ سپس تغییری درمحیط از قبیل‌دما یا حرکت الکترولیت، می‌تواند «قطبش کاتدی» را به‌طور ناگهانی کاهش دهد. بنابراین سرعت خوردگی تاحد زیادی تغییر می‌کند. این‌امر دلیل بعضی سرعتهای نامنظم خوردگی است‌که معمولا درعمل باآن برخورد می‌کنیم.

---

* درمورد پیل خشك یا باتری، که خوردگی برای تولید جریان به‌کار می‌رود، این‌حالت مطلوب نیست.

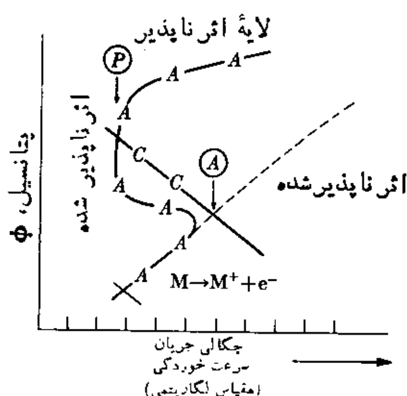



**شکل ۱۲-۴-۳** قطبش. الف) وقتی غلظت الکترولیت درکاتد و دما بالا باشد و الکترولیت راکد نباشد، چگالی جریان عادی است (خط‌چین)، و در غیر این‌صورت چگالی جریان عقب خواهد بود، ب) با عقب‌افتادگی چگالی جریان، جریان خوردگی، $i_{co}$، از مقدار پیش‌بینی‌شده کمتر می‌شود. هرگاه‌درعمل شرایط محیط چنان تغییرکند که دسترسی به‌مواد واکنشگر بیشتر شود، این قطبش ازبین می‌رود.

**اثر ناپذیرسازی.** در پاراگراف قبل گفته‌شد که الکترولیت معمولا نسبت به‌محصول آند رقیق است، بنابراین معمولا قطبش آندی اتفاق نمی‌افتد. ولی آنـد ممکن است به وسیلهٔ واکنشهای غیرخورنده ازالکترولیت جداشود. اینها برای کنترل خوردگی بسیار مهم‌اند، زیرا سرعت‌خوردگی را تغییر می‌دهند.

فرض‌کنید درشکل ۱۲-۴-۲ به‌جای آهن، فولاد زنگ‌نزن‌قرارگیرد. در مجاورت اکسیژن اضافی، لایه‌ای از اکسیدکـه شامل کرم است روی سطح آنـد تشکیل می‌شود و آن را از الکترولیت جدا می‌سازد. با افزایش پتانسیل اکسایش، منحنی چگالی جریـان آند، $A$، به‌طور محسوسی تحت‌تأثیرقرارمی‌گیرد (شکل۱۲-۴-۴). این حالت «اثر ناپذیر شدن» نامیده می‌شود. اثر آن روی سرعت‌خـوردگی مشخص است. زیرا چگالی جریـان خوردگی، $i_{co}$، ممکن است دهها برابر از(A) به(P)کم‌شود.

اثر ناپذیر شدن فولاد زنگ‌نزن به‌این دلیل است‌که کرم میل ترکیبی شدیدی بـا اکسیژن دارد. بدین‌ترتیب مـی‌بینیم کـه در شرایط اکسیدکننده، سرعت خـوردگی فولاد زنگ‌نزن زیاد نیست (البته صفرهم نیست). به‌همین‌ترتیب بسیاری از فلزات در $HNO_3$ به‌آرامی خورده می‌شوند و این به‌دلیل خاصیت اکسیدکنندگی این اسید است. حال‌آنکه همان فلزات در مجاورت HCl سریعاً خورده مـی‌شوند زیرا منبعی برای تولید اکسیژن وجود ندارد.




**شکل ۱۲-۴-۴** اثرناپذیر شدن. فلزاتی مانند آلومینیم، تیتانیم و فولاد زنگ‌نزن در محیطهای اکسیدکننده لایهٔ محافظ پایداری روی سطح آنها تشکیل می‌دهند. چگالی‌جریان آند ازمقدارعادی دورمی‌شود (خطچین)، بنابراین چگالی جریان‌خوردگی (محل‌تلاقی دومنحنی) به‌طور اساسی کم می‌شود. هرگاه لایهٔ اکسید از بین برود، سرعت خوردگی سریعاً از مقدار غیرفعال (P) به‌مقدار فعال (A) می‌رسد.

آلـومینیم و تیتانیم روی سطح خود لایهٔ اکسید محافظ $Al_2O_3$(و $TiO_2$) تشکیل می‌دهند. این لایه به‌قدری محافظ است که چگالی جریان خوردگی تقریباً به‌صفر می‌رسد و می‌توان قایق آلومینیمی ساخت!* آنـدی‌کردن عبارت از فرایندی تجارتی است کـه پوشش اکسیدی محافظی برروی آلومینیم ایجاد می‌کند.

**مثال ۱۲-۴-۱** چگالی متوسط جریان خوردگی برای آهن $2\ amp/m^2$ است.

الف) در هر سانتی مترمربع سطح در هرثانیه چندیون $Fe^{2+}$ تشکیل می‌شود؟

ب) اگر فقط ۱۰٪ سطح، آند محسوب شود، عمق خوردگی درهرماه چقدر است؟

حل:

الف) $(2\ amp/m^2)/(2\ el\cdot/Fe^{2+})(0.16\times10^{-18}\ amp{\cdot}sec/el\cdot)$

$= 6\times10^{18} Fe^{2+}/sec{\cdot}m^2$

---

* برای‌اجتناب ازهرگونه‌اشتباهی به سه‌مورد زیر توجه‌کنید: (۱) اکسیژن‌خوردگی را تسریع می‌کند. (۲) دریك پیل اکسایشی، خوردگی در محلی که اکسیژن نیست تسریع مـی‌شود زیرا اکسیژن برطرف کاتدی پیل اثر می‌کند و الکترونهـا را از آند بیرون‌کشیده درآنجا موجب خوردگی می‌شود. (۳) سرانجام، برخی از فلزات (مانند آلومینیم و فـولاد زنگ‌نزن) چون می‌توانند با اکسیژن ترکیب شوند و لایهٔ محافظ سطحی تشکیل‌دهند اثرناپذیر می‌شوند. فلزی که ازنظرالکتریکی عایق شده باشد خورده نمی‌شود.

$$= ۶ \times ۱۰^{۱۲} Fe^{۲+}/sec\, mm^۲.$$

ب) $(۶ \times ۱۰^{۱۸} Fe/sec{\cdot}m^۲)/(۰٫۱۰) =$ سرعت خوردگی موضعی

$= ۶ \times ۱۰^{۱۹} Fe/sec{\cdot}m^۲$ موضعی

$$\frac{(۶ \times ۱۰^{۱۹} Fe/sec{\cdot}m^۲)(۲٫۶ \times ۱۰^۶ sec/mo)(۱۰^۳ mm/m)}{(۰٫۶ \times ۱۰^{۲۴} Fe/۵۵٫۸۵\, g)(۷٫۸۶ \times ۱۰^۶\, g/m^۳)}$$

$$= \sim ۲\, mm/mo.$$

توضیح. هر عاملی که خوردگی را موضعی کند. [شکل ۱۲-۳-۹ (د) را ببینید] روی عمر قطعه شدیداً اثر می‌گذارد، زیرا با آنکه بیشتر فلز سالم است ولی ممکن است شکست صورت گیرد. برای مثال نقاط زنگ‌زدهٔ روی سپرماشین را بررسی کنید. ▲

**مثال ۱۲-۴-۲** لایهٔ $Al_۲O_۳$ که روی آلومینیم تشکیل می‌شود، فلز را اثرناپذیر می‌سازد. ضخامت این لایه چقدر باشد که چگالی جریان خوردگی در پیلی‌که ۲ ولت تولید می‌کند، برابر $۱۰^{-۴} amp/m^۲$ شود؟

حل: مبنا: $۱cm^۲ = ۱۰^{-۴}m^۲$؛ بنابراین $۱۰^{-۸}amp$. ازآنجاکه $E = IR$

$$R = \frac{۲\, V}{۱۰^{-۸}amp} = ۲ \times ۱۰^۸\, \Omega$$

از $\rho = RA/L$ و پیوست (ج)

$$L = \frac{(۲ \times ۱۰^۸ \Omega)(۱۰^{-۴}m^۲)}{> ۱۰^{۱۲}\, \Omega{\cdot}m}$$

$$= < ۲ \times ۱۰^{-۸} m, \text{ یا } ۲۰\, nm.$$

توضیح. ضخامت لایهٔ اکسید ازطول موج‌نور کمتر است ($\sim ۵۰۰\, nm$). درنتیجه آن را نخواهیم دید. حتی باوجود این چگالی جریان و سرعت خوردگی را تا اندازه‌ای که قابل‌اغماض است پایین می‌آورد، البته آلومینیم اگر در محیطهایی مثل محلول قلیایی قرار گیرد که در آن لایهٔ $Al_۲O_۳$ حل می‌شود، اثرناپذیری ازبین می‌رود. ▲

## ۱۲-۵ کنترل خوردگی

جلوگیری کامل ازخوردگی فقط درصورت نبودن الکترولیت میسر است. تازه این‌هم مشکل است. همان‌طورکه می‌دانید ابزاری که در کارگاه آویزان‌اند لایهٔ رطوبتی جذب می‌کنند وزنگ می‌زنند،سازندگان ابزار از این‌امر آگاهند،درنتیجه‌این گونه ابزار را قبل

ازحمل برای خرده‌فروش یا مشتری بالایه‌ای از گریس یا روغن می‌پوشانند.

از آنجا که خوردگی‌واکنشی گالوانی‌است، برای ادامهٔ آن باید دونوع فلزموجود باشد. مهندس طراح با آگاهی از این‌موضوع سعی‌می‌کند از به‌کاربردن «پیچ‌برنجی-واشر فولادی» خودداری‌کند. شایدبسیاری ازمتخصصین فنی‌ندانند که دریك مادهٔواحد به‌موجب میکروساختار تمرکز تنش، یـا ناهمگنی الکترولیت، آند و کاتد به‌وجود مـی‌آید (بخش ۱۲ــ۳). چنین نکاتی باید هنگام کنترل‌خوردگی درنظرگرفته شوند.

در این‌بخش علاوه‌بر (۱) ایجادسطوح محافظ و (۲) اجتناب‌ازجفتهای گالوانی، روش دیگری برای کمینه‌کردن خـوردگی یعنی (۳) محافظت گالوانی موردبحث قرار می‌گیرد. این سه‌روش موضوع این بخش‌اند.

**سطوح محافظ.** قدیمیترین‌روش متداول برای‌کنترل خوردگی، محافظت سطح فلزاست. مثلا پوششی از رنگ، فلززیرین را از الکترولیت خورنده جدامی‌کند. مهمترین محدودیتی که این‌روش دارد، رفتار لایهٔ محافظ در حین‌کار است. لایهٔ گریسی‌که قبلا ذکر شد مسلماً دوام زیادی ندارد. دمای بالا و سایش مـواد سایـا محدودیتهایی درمورد پوششهای آلی به‌وجود می‌آورند.

ولی روکشهای محافظ الزاماً از مواد آلی‌نیستند. مثلا قلع‌می‌تواند به‌عنوان روکش «بی‌اثر» برای‌فولاد به‌کار رود. آبکاری با نیکل، مس، نقره وغیره‌مثالهایی از ایجاد سطوح مقاوم در برابر خوردگی‌اند. بعضی از فلزات را می‌تـوان به‌عنوان پوششهای فروتندایی داغ بـه‌کار برد، مثل فروبردن سیم یـا ورق فولادی در روی مذاب این فرایند «روینه‌کاری» نامیده می‌شود. مواد سرامیکی بی‌اثر نیز ممکن است برای روکش محافظ به‌کار آیند. مثلا لعابهای واقعی‌روکش اکسیدی‌اندکه‌به‌صورت پودرشیشه به‌کار می‌روند وپس‌ازذوب‌شدن به‌صورت لایهٔ سطحی شیشه‌ای درمی‌آیند. مزایـا و مضرات چنددسته از روکشهای محافظ در جدول ۱۲ــ۵ــ۱ ذکر شده است.

اثر ناپذیرشدن، که در بخش‌قبل موردبحث قرار گرفت، نیز روکش یـا لایهٔ نازك محافظی ایجاد می‌کند همانطورکه ازجدول ۱۲ــ۵ــ۲ پیداست. اهمیت آن بخصوص برای آلومینیم و یاتاقانهایی است کـه از فولادزنگ‌نزن کرم‌دار ساخته می‌شوند. تفاوت این مجموعهٔ گالوانی با جدول ۱۲ــ۲ــ۱ درآن است‌که دراینجا آلیاژهای معمولی که غالباً تحت‌شرایط خوردگی مصرف می‌شوند، ذکر شده‌است و درمیان آنها بعضی از فلزات‌قبلی نیز آمـده است. یادآوری می‌شودکه تعدادی از آلیاژهـا دوبار نوشته شده‌اند، یکی در حالت‌فعال و باردیگر در شرایط اثرناپذیر. زیرا وجود لایهٔ اکسیدی روی سطح، آلیاژها را به‌طرف انتهای‌کاتدی این مجموعه‌سوق می‌دهد. درحقیقت، وقتی این فولادها اثرناپذیر شوند کمتر از مس، مفرغ و برنج قابل‌خورده شدن‌اند. دراین مـورد یك‌نکته حائز اهمیت است، چگالی جریان خوردگی فلز غیرفعال شده‌ای درشکل ۱۲ــ۴ــ۴ به‌صورت نقطهٔ $P$ نشان داده شده است، هرگاه شرایط‌کار طوری تغییرکنندکه لایهٔ اکسیدی محافظ آن‌خراب

**جدول ۱۲-۵-۱** مقایسهٔ پوششهای محافظ بی‌اثر

| نوع | مثال | مزایا | مضرات |
|---|---|---|---|
| آلی | رنگهای«لعابی»پخته‌شده | انعطاف‌پذیرکاربرد آسان<br>ارزان | اکسید شونده،نسبتاً نرم<br>محدودیتهای دمایی |
| فلزی | آبکاری با فلزات نجیب | تغییرشکل‌پذیر<br>نامحلول‌درمحلولهای آلی<br>رسانای گرما | ایجاد پیل گالوانی در<br>صورت پارگی |
| سرامیکی | روکش اکسیدی لعابی شیشه‌ای | مقاوم در دمای بالا<br>سخت‌تر<br>عدم ایجاد پیل بافلز اصلی | شکننده،عایق گرما |

شود، چگالی جریان خوردگی دهها بار بیشترشده و به‌نقطه(A) می‌رسد. واضح است که دراین‌مورد هم‌مهندس طراح وهم‌مدیرفنی باید دقت‌کافی مبذول دارند.

بازدارنده‌ها ترکیباتی‌اندکه‌به‌الکترولیت اضافه می‌شوند تااز خوردگی مخازن‌فلزی جلوگیری‌کنند. آشناترین آنها ضدزنگی است که در رادیاتور اتومبیل ریخته می‌شود تا خوردگی را کاهش‌دهد. همچنین ممکن‌است در دیگ بخار و یا سایر سیستمهای آب‌داغ به‌کار روند. بازدارنده شامل آنیونهای چنداتمی است‌که درسطح فلز جذب می‌شوند و لایه‌ای محافظ وغنی ازاکسیژن تشکیل‌می‌دهد، که به‌آنچه دراثرناپذیرشدن به‌دست‌می‌آید، شبیه‌است. معمولا بازدارنده‌ها شامل ترکیبات کرمات، فسفات، تنگستات، یا یونهای دیگر عناصر واسطه‌ای‌اند که قابلیت اکسیدکنندگی آنها بالاست.

**اجتناب از جفتهای گالوانی.** ساده‌ترین روش اجتناب از جفت گالوانی محدودکردن طراحی به‌تنها یك‌فلز است، ولی این‌کار همیشه عملی نیست. دربرخی شرایط می‌توان فلزاتی‌که ترکیب متفاوت دارند را ازنظر الکتریکی عایق و از ایجاد پیل‌جلوگیری‌کرد.

سایر روشهای ساده‌تر ضمانت‌کمتری دارند، فولاد زنگ‌نزن مثال ویژه‌ای ارائه می‌دهد. در انواع مختلف فولاد زنگ‌نزن مقدار کرم از ۱۳ تا ۲۷٪ تغییر می‌کند. هدف از وجود کرم به‌وجودآوردن ترکیبی است که به‌طورعادی سطح اثرناپذیری تشکیل دهد.

**جدول ۱۲-۵-۲** مجموعهٔ گالوانی آلیاژهای متداول.

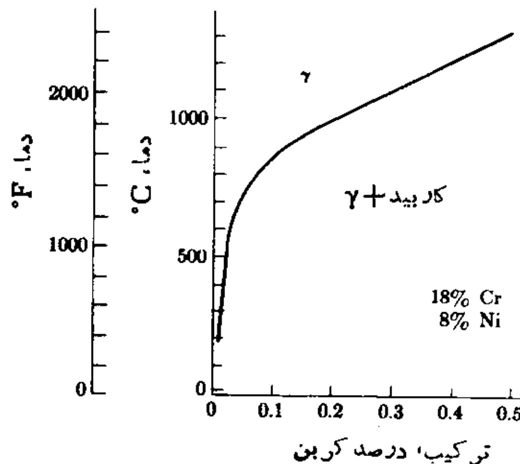
| | کاتدی |
|---|---|
| A — نیکل | گرافیت |
| قلع | نقره |
| سرب | P — فولاد %۱۲Ni، %۱۸Cr، %۳Mo |
| لحیم سرب-قلع | P — فولاد %۲۰ Ni، %۲۵ Cr |
| A — فولاد %۱۲ Ni، %۱۸ Cr، %۳ MO | P — فولاد Cr ۲۳ تا %۳۰ |
| A — فولاد %۲۰ Ni، %۲۵ Cr | P — فولاد %۱۴ Ni، %۲۳ Cr |
| A — فولاد %۱۴ Ni، %۲۳ Cr | P — فولاد %۸ Ni، %۱۸ Cr |
| A — فولاد %۸ Ni، %۱۸ Cr | P — فولاد %۷ Ni، %۱۷ Cr |
| A — فولاد %۷ Ni، %۱۷ Cr | P — فولاد Cr ۱۶ تا %۱۸ |
| Ni-resist | P — فولاد Cr ۱۲ تا %۱۴ |
| A — فولاد Cr ۲۳ تا %۳۰ | P — %۸۰ Ni، %۲۰ Cr |
| A — فولاد Cr ۱۶ تا %۱۸ | P — اینکونل |
| A — فولاد Cr ۱۲ تا %۱۴ | P — %۶۰ Ni، %۱۵ Cr |
| A — فولاد Cr ۴ تا %۶ | P — نیکل |
| چدن | فلز مونل |
| فولاد مسی | نیکل-مس |
| فولاد کربنی | نقره-نیکل |
| آلیاژ آلومینیم ۲۰۱۷-T | مفرغها |
| کادمیم | مس |
| آلومینیم ۱۱۰۰ | برنجها |
| روی | A — %۸۰ Ni %۲۰Cr |
| آلیاژهای منیزیم | A — اینکونل |
| منیزیم آندی | A — %۶۰ Ni، %۱۵ Cr |

A فعال بودن و P اثر ناپذیر بودن را نشان می‌دهد.

بعضی از فولادهای‌زنگ‌نزن (نه‌همهٔ آنها)، ۸ تا ۱۰٪ نیکل‌دارند که نجیبتراز آهن است. (جدول ۱۲-۲-۱).

□ فولاد زنگ‌نزن «۸-۱۸» (یعنی ۱۸٪ Cr و ۸٪ Ni) مقدار زیادی عناصر آلیاژی دارد که موجب تشکیل استنیت می‌شود، استنیت در دمای متعارفی پایدار است. چنین فولادی درکاربردهایی‌که به‌سختی زیاد نیاز دارند به‌کار نمی‌رود، بلکه در شرایط خورنده به‌کار می‌رود. به‌این جهت کربن که در دماهای بالا حلالیت بیشتری در استنیت دارد (شکل ۱۲-۵-۱) کمترین مقدار انتخاب می‌شود. اگر فولادی با ۰٫۱٪ کربن از $1000^\circ C$ ($1800^\circ F$) به‌طور سریع سردشود، کاربید جداگانه تشکیل نمی‌شود و پیل گالوانی به‌وجود نمی‌آید، ازطرف دیگر اگرهمین فولاد به‌آهستگی سرد شود، درحوالی $650^\circ C \pm$ ($1200^\circ F$~) برای مدت‌کوتاهی نگهداشته شود، کربن به‌صورت کرم کاربید رسوب‌می‌کند واین‌رسوب معمولا در مرزدانه‌ها تشکیل‌می‌شود (شکل ۱۲-۵-۲). در این‌صورت دوحالت‌وجود دارد: (۱) ممکن‌است پیل گالوانی درمقیاس میکروسکوپی به‌وجود آید، یا (۲) کربن، کاربید کرم تشکیل دهد (که پایدارتر از $Fe_3C$ است) و مرزدانه‌هارا ازکرم‌تهی‌کند تااثرناپذیر بودن به‌طور موضعی‌ازبین‌برود (شکل ۱۲-۵-۳). در هردوحالت خوردگی در مرزدانه‌ها تشدید می‌شود که باید از آن جلوگیری کرد (شکل ۱۲-۵-۴).

□ برای جلوگیری از خوردگی بین دانه‌ای چندروش وجود داردکه باتوجه به‌شرایط کاربرد، یکی‌از آنها انتخاب می‌شود.




**شکل ۱۲-۵-۱** حلالیت کربن درفولاد زنگ‌نزن استنیتی. باکاهش دما حلالیت‌کربن در فولاد زنگ‌نزن‌نوع «۸-۱۸» به‌مقدار زیادی‌کم می‌شود. بنابراین‌اگر سردکردن سریع‌نباشد، کربن رسوب می‌کند. کاربید رسوب کرده غنی ازکرم است.



**شکل ۱۲-۵-۲** رسوب کاربید درمرزدانه‌ها، ۱۵۰۰ ×. اتمهای کوچك کربن به‌راحتی در مرزدانه‌ها نفوذ می‌کنند واگر زمان کافی باشد (چند ثانیه در $650°C$) به‌صورت کاربیدکرم رسوب می‌کنند. پس پیل گالوانی تشکیل می‌شود.

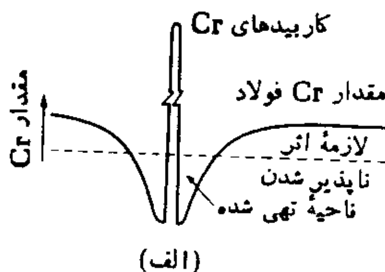
۱. آب‌دادن برای جلوگیری از رسوب کربن. این‌روش معمولا به‌کار می‌رود مگر الف) دمای لازم درهنگام استفاده از فولاد در گسترهٔ رسوب باشد، یا ب) در شکل‌دادن، جوشکاری و در مواردی‌که ابعاد قطعه مانع آب‌دادن می‌شود.

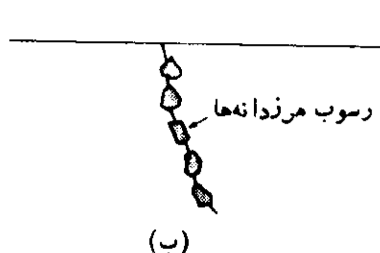
۲. تابکاری بسیار طولانی‌در گسترهٔ جدایش کاربید. مزایای این روش عبارت‌اند از الف) انباشتگی ذرات کاربید وب) همگن‌شدن مقدارکرم به‌طوری که در مرزدانه کمبود کرم به‌وجود نیاید. ولی این روش متداول نیست زیرا به این ترتیب مقاومت در برابر خوردگی چندان‌زیاد نمی‌شود.

۳. انتخاب فولادی‌که‌کمتراز ۰۳ر۰٪کربن داشته باشد.همان‌طور که شکل۱۲-۵-۱ نشان می‌دهددراین‌صورت از رسوب‌کردن‌کاربید جلوگیری می‌شود. ولی این فولادگرانی است زیرا خارج‌کردن کربن ازفولاد و به‌دست‌آوردن چنین ترکیبی مشکل است.

۴. انتخاب فولادی‌که مقدار زیادی کرم دارد. فولادی که ۱۸٪کرم دارد مشکلتر از فولاد ساده خورده می‌شود. افزایش‌کرم (نیکل) حفاظت بیشتری در برابر خوردگی به‌وجود می‌آورد. این کار نیز به‌علت بالابودن قیمت عناصرآلیاژی گران تمام می‌شود.

۵. انتخاب فولادی که شامل عناصر تشکیل‌دهندهٔ قوی کاربید است. این‌عناصرشامل




**شکل ۱۲-۵-۳** تهی‌شدن ازکرم درنواحی مجاورمرزدانه. رسوب کردن کاربید تقریباً ده‌برابر کربن، کرم مصرف می‌کند.چون اتمهای کرم بزرگترند و به‌کندی نفوذمی‌کنند. مقدارکرم درنواحی مجاور مرزدانه‌ها ازمقدارلازم برای محافظت کمتراست.



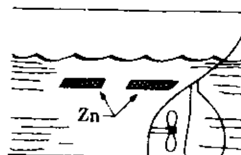
**شکل ۱۲-۵-۴** خوردگی بین‌دانه‌ای. اگر فولاد تا گسترهٔ رسوب کاربید گرم شود، این نوع خوردگی بسیار شدید می‌شود.

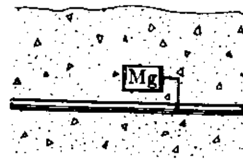
تیتانیم، کلمبیم، و تانتالم‌اند. درچنین فولادهایی به‌هنگام سردشدن، کربن در مرزدانه‌ها رسوب نمی‌کند زیرا قبلا در دماهای بسیار بالاتر به‌صورت کاربید تیتانیم، کاربید کلمبیم یا کاربید تانتالم رسوب کرده است. این کاربیدها بی‌ضررند زیرا نه‌فولاد را ازکرم تهی می‌کنند و نه‌واکنش گالوانی را در مرزدانه‌ها به‌وجود می‌آورند. چنین روشی بخصوص در قطعات تولیدی از فولاد زنگ‌نزن که باید به وسیلهٔ جوشکاری ساخته شوند بسیار متداول است.

مثالهای بالا با آنکه خصوصاً درمورد فولاد گفته شده‌اند ولی روشهایی را نشان می‌دهند که برای کاهش خوردگی در فلزات مختلف می‌توان به‌کار برد. انتخاب دقیق طرزکار به‌نوع آلیاژ و شرایط استفاده ازآن بستگی دارد.

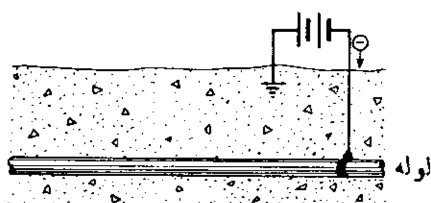
**محافظت گالوانی.** با استفادهٔ بجا ازمکانیسم خوردگی می‌توان آن را تا اندازه‌ای محدود کرد. نمونه‌ای ازآن آهن رویینه کاری شده است که دربخش (۱۲-۳) درموردآن بحث شد. پوشش روی به‌عنوان آند قربانی عمل می‌کند و به‌جای فولاد زیرآن خورده می‌شود. همین‌روش را در موارد دیگر می‌توان به‌کار برد. سه‌مثال آن درشکل ۱۲-۵-۵ دیده می‌شود. مزیت چنین روشی آن است که آند از بین رفته به‌آسانی قابل تعویض است. مثلا




**شکل ۱۲-۵-۵** آندهای قربانی. الف) ورقهای منیزیم درطول لوله‌کشی زیرخاك؛ ب) ورقهایی از روی درسطح بدنهٔ کشتی؛ ج) میلهٔ منیزیمی در مخزن آب‌گرم صنعتی. هریك از این آندهای قربانی به‌آسانی قابل‌تعویض‌اند و موجب‌کاتد شدن جسم می‌شوند.




**شکل ۱۲-۵-۶** ولتاژمؤثر. ولتاژ کم‌جریان مستقیم به‌اندازهٔ کافی الکترون تولید خواهد کرد که قطعه را کاتد کند.

درشکل ۱۲-۵-۵ (الف) ورقهای منیزیم را می‌توان باصرف هزینه‌ای بسیار کمتر ازهزینهٔ عوض‌کردن لوله‌های زیرزمینی تعویض‌کرد.

روش‌دوم محافظت گالوانی استفاده از ولتاژمؤثر روی فلزاست که درشکل ۱۲-۵-۶ دیده مـی‌شود. هردو روش یعنی آندقربانی و ولتاژ مؤثر اصل‌محافظتی یکسانی دارنـد، به‌این‌ترتیب که‌الکترون اضافه‌تولیدمی‌کنند به‌طوری‌که فلز کاتد شده، واکنشهای‌خوردگی متوقف می‌شوند.

## مرور و بررسی مطالب

### خلاصه

ابتدا ملاحظه کردیم که خوردگی عکس‌آبکاری برقی‌است و برهمین‌اساس مقدارخوردگی را به‌شدت جریان ربط دادیم برای انجام خوردگی یـا آبکاری برقی دوالکترود و یك الکترولیت لازم است.

بیشترخوردگی ازپیلهای گالوانی و جریان‌الکتریکی حاصل از آن ناشی می‌شود. دوالکترود متفاوت لازم است‌که بـه یکی از صورتهای زیر تولید شود: (۱) اختلاف در ترکیب، (۲) اختلاف در تراز انرژی (نامنظم، یانواحی تنش‌دار)، یـا (۳) اختلاف در محیط الکترولیتی.این مطالب درجدول ۱۲-۵-۳ به‌طور مفصلتر آمده‌اند. الکترودی که خورده می‌شود آند است وکاتد محافظت می‌شود.

اکسیژن خوردگی فلزات را تسریع می‌کند. ولی خوردگی در محلی شدت می‌یابد که اکسیژن کم باشد، زیرا اکسیژن در طرف کاتدی‌پیل‌گالوانی وارد واکنش می‌شود. در آلومینیم، تیتانیم، و فولادهای‌کرم‌دار، اکسیژن لایهٔ محافظی ایجاد می‌کند. این پدیده را اثرناپذیرسازی می‌نامند و مبنای بی‌اثرشدن نسبی فولادهای زنگ‌نزن است.

اگر درحوالی سطح‌الکترود، الکترولیت از واکنشگرها تهی شود، روی‌کاتد قطبش اتفاق می‌افتد و درنتیجه چگالی جریان کم می‌شود. ازطرفی چون واکنشگرهـا (اکسیژن و یونها) در دماهای بالاتر یا باهم‌زدن سریعاً افزایش می‌یابند، قطبش باتغییر شرایط کار تا حد زیادی تغییر می‌کند.

ساده‌ترین‌راه کنترل خوردگی‌جداکردن سطح فلز ازمحیط‌به‌وسیلهٔ روکشهای محافظ یعنی مواد آلی (رنگ)، سرامیکی (لعاب)، یـا فلزات دیگر است. بـاوجود این کنترل

**جدول ۱۲-۵-۳** خلاصه‌ای از پیلهای گالوانی.

| مثالهای ویژه | آند | کاتد |
| --- | --- | --- |
| | فلز اصلی | فلز نجیب |
| Zn در مقابل Fe | Zn | Fe |
| Fe در مقابل $H_2$ | Fe | $H_2$ |
| $H_2$ در مقابل Cu | $H_2$ | Cu |
| | انرژی بیشتر | انرژی کمتر |
| مرزها | مرزدانه | دانه |
| تنشها | سردکاری‌شده | تابکاری‌شده |
| خوردگی تنش | نواحی تنش‌دار | نواحی بدون تنش |
| | غلظت کمتر | غلظت بیشتر |
| الکترولیت | محلول رقیق | محلول غلیظ |
| اکسایش | $O_2$ کم | $O_2$ زیاد |
| محل کثیف | نواحی پوشیده شده | نواحی تمیز |

خوردگی هنگامی رضایت‌بخش است که‌از ایجاد جفتهای گالوانی اجتناب شود. درمحیط بسیار خورنده، فلزات مختلف باید ازنظر الکتریکی جدا باشند. در مورد فولاد زنگ‌نزن باید دقت بیشتری کرد که پیل گالوانی در میکروساختار (مثلا کاربید در نواحی خالی از کربن) به‌وجود نیاید. دربرخی موارد نیز محافظت از خوردگی بااستفاده از آند قربانی یا ولتاژ مؤثر عملی می‌شود. در هردوصورت فلز محافظت شونده کاتد خواهد بود.

## سؤالات تشریحی

۱. فرق‌بین آند و کاتد را برمبنای‌حرکت الکترونی شرح‌دهید. طبق‌تعریفات بخش۱۲-۱، لولهٔ اشعهٔ کاتدی چگونه توضیح داده می‌شود؟

۲. چرا ۹۶۵۰۰ کولن برابر یک‌فاراده، $\mathcal{F}$ است.

۳. منبع الکترونها در پیل‌خشك معمولی چیست؟ (الکترولیت خمیری ژلاتینی حاوی $NH_4Cl$ است. واکنش کاتدی، $Mn^{4+}$ در $MnO_2$ را به $Mn^{2+}$ تبدیل می‌کند.)
۴. چرا از الکترود هیدروژن به‌عنوان الکترود مرجع استفاده می‌شود وعنصر دیگری مثل سرب به‌کار نمی‌رود؟
۵. قوطی کنسرو پوشیده شده ازقلعی در دریاچه‌ای انداخته شده است. رابطهٔ (۱۲-۲-۳) به‌عنوان واکنش آندی به‌وجود می‌آید. واکنش کاتدی واکنش $Sn^{2+} + 2e^- \rightarrow Sn$ نیست. چرا؟ واکنش احتمالی کاتدی چیست؟
۶. تحت چه‌شرایطی زنگ‌زدگی به‌وجود نخواهد آمد؟ چرا؟
۷. پیشنهاد شده است که با به‌کاربردن محلول‌آبی NaOH ($pH = ۱۴$) و الکترولیز کردن آن سدیم به‌دست‌آوریم. در این‌باره شرح دهید.
۸. تفاوت بین‌نوع حفاظتی‌که توسط روی و قلع ازآهن به‌عمل می‌آید را مشخص‌کنید.
۹. در کدهای لوله‌کشی به‌عایقهایی اشاره می‌شود مثل تفلون‌که در سیستم لوله‌کشی بین لوله‌های مسی و فولادی قرار می‌گیرد. در این‌باره شرح دهید.
۱۰. در کدهای الکتریکی به «فنرعایق» اشاره می‌شودکه اطراف این جفت‌عایق‌شده قرار می‌گیرد تا آن را به‌زمین مربوط‌کنند. آیا این ضدکد لوله‌کشی است؟ شرح دهید.
۱۱. میخی با پوششی از روی، از نیمه‌برش داده شده و در الکترولیتی قرار داده می‌شود. الف) برای قضاوت درمورد محل‌آند چه جفتهایی باید درنظر گرفته شوند؟ب) محلی را که ابتدا خورده خواهد شد ذکر کنید.
۱۲. شرح دهیدکه چرا فلز در الکترولیت رقیق‌نسبت به‌فلزی‌که در الکترولیت غلیظ قرار دارد آند می‌شود.
۱۳. شرح دهیدکه چرا فلز در الکترولیت‌کم اکسیژن نسبت به‌فلزی که در الکترولیت غنی از اکسیژن قرار دارد، آند می‌شود.
۱۴. اگر اکسیژن خوردگی را تشدید می‌کند (روابط ۱۲-۲-۸ و ۱۲-۲-۹)، چرا در نواحی‌کم اکسیژن خوردگی صورت می‌گیرد؟
۱۵. چگونه صدفها خوردگی تنهٔ‌کشتی را تشدید می‌کنند؟
□ ۱۶. چرا وقتی از آلومینیم به‌جای آهن در ظروف آشپزخانه استفاده می‌شود خوردگی کمتر است؟
□ ۱۷. چرا وقتی که آند کوچکتر از کاتد است خوردگی تشدید می‌شود ولی اگر عکس آن باشد اینطور نیست؟
□ ۱۸. «سوراخهای ریز» در ورقهایی‌که‌باقلع پوشش داده‌شده‌اند، برای سازندگان‌قوطیهای کنسرو دردسر ایجاد می‌کنند. دراین‌باره توضیح دهید.
□ ۱۹. نورفلاش با باتری خشك قدیمی درحین‌کار کم‌نور می‌شود. اگر مدت‌کوتاهی از آن استفاده نشود، دوباره بانور بیشتری روشن خواهد شد. دراین باره توضیح دهید.
۲۰. توده‌های‌فولاد درسطوح برآمدهٔ بالابسیار بیشترازسطوح‌پایینترخورده‌می‌شوند. چرا؟

□ ۲۱. لعاب شیشه‌ای (شیشه) برای پوشش دادن گرم‌کنندهٔ آب‌منازل به‌کار می‌رود. انبساط گرمایی شیشه و فلز در مقایسه با یکدیگر باید چگونه باشد؟ (فصل ۸ را ببینید.)

۲۲. مکانیک کارخانه‌ای استفاده از پیچ تخلیهٔ منیزیمی را برای پوستهٔ میل‌لنگ اتومبیل به‌عنوان وسیله‌ای برای مبارزه با خوردگی موتور پیشنهاد می‌کند. دراین‌باره توضیح دهید.

۲۳. پوششهای آستری از انواع مختلف برای اتومبیلهای جدید به‌کار می‌روند. تحت چه شرایطی این پوششها مؤثرند؟ تحت چه‌شرایطی مضرند؟

۲۴. آیا امکان دارد که‌برای محافظت از تنهٔ‌کشتی از ولتاژمؤثر استفاده کرد؟ توضیح دهید.

۲۵. سه‌نمونه از خوردگیهایی را که با آن برخورد کرده‌اید ذکر کنید. ماهیت زوال آنها را شرح دهید و علل خوردگی را بیان کنید.

□ ۲۶. ورقی از فولاد زنگ‌نزن به‌مجرای دایره‌ای شکلی جوش داده شده است. پس‌از مدتی درطول نواری به موازات هرطرف از جوش، به‌فاصله‌ای حدود یک‌سانتی‌متر زنگ‌زدگی پدیدمی‌آید. چرا این پدیده‌صورت می‌گیرد؟ آیامی‌توانیم از این‌امرجلوگیری کنیم؟

## مسائل

۱۲ــ۱ــ۱ برای پوشش دادن هر گرم نیکل از الکترولیت $Ni^{2+}$، چندکولن لازم است؟

جواب: ۳۳۰۰ coul

۱۲ــ۱ــ۲ اگر بخواهیم‌درمدت ۹۰دقیقه پوششی از نیکل به‌ضخامت ۰٫۱ میلی‌متر، روی قطعه‌ای ازمس ($۱۲۳۰\ mm^2$) رسوب دهیم چه شدت جریانی لازم است؟

۱۲ــ۱ــ۳ باز تابنده‌ای فلزی به‌ساحت $۱٫۲۷\ m^2$ آبکاری می‌شود. شدت جریان ۱۰۰ آمپر است. الف) در حین آبکاری، در هرساعت چند گرم $Cr^{2+}$ باید به‌الکترولیت اضافه شود؟ ب) ضخامت پوشش تشکیل شده در هرساعت چقدر است؟

جواب: الف) ۹۷g ب) ۰٫۰۱ mm (یا ۱۰ μm)

۱۲ــ۱ــ۴ چه‌مدت طول‌می‌کشد تا از الکترولیت $Cr^{2+}$ و شدت جریان ۱ آمپر، یک‌گرم کرم رسوب داده شود؟

**۱۲ــ۱ــ۵** درهرثانیه یک‌حباب هیدروژن از کاتد متصاعد می‌شود. هرکدام وقتی از سطح الکترولیت خارج می‌شوند $۱\ mm^3$ حجم دارند جریان الکترونی موجود چقدر است؟ (۱ مول گاز درشرایط $STP = ۰٫۰۲۲۴\ m^3$)

جواب: ۸٫۶ mA

**۱۲-۱-۶** برای خالص‌کردن آلومینیم ابتدا $Al_2O_3$ را درنمك مذابی ذوب می‌کنیم و سپس فلز را روی کاتد رسوب می‌دهیم. برای ایجاد ۰٫۱ گرم رسوب در روز، روی هر $mm^2$ از سطح الکترود، چگالی جریان چند $amp/mm^2$ است؟

جواب: $0{,}124\, amp/mm^2$

**۱۲-۲-۱** الکترودهای پیل گالوانی استانداردی نیکل و منیزیم‌اند. چه‌اختلاف پتانسیلی ایجاد خواهد شد؟

جواب: ۲٫۱ ولت (درصورتی‌که کاتد از نیکل باشد.)

**۱۲-۲-۲** برای تعیین پتانسیل الکترود کادمیم، شکل ۱۲-۲-۱ به‌جای روی و مس برای کادمیم ونقره تکرار شده است. ولت‌سنج ۱٫۲۰ -ولت را نشان می‌دهد. پتانسیل الکترود کادمیم در مقایسه با هیدروژن چقدر است؟

**۱۲-۲-۳** برای داشتن پتانسیل الکترود $0{,}32\, V$ (در مقایسه باهیدروژن) غلظت مس‌در الکترولیت چقدر $(g/l)$ باید باشد؟

جواب: ۱۳٫۴g برلیتر

**۱۲-۲-۴** توضیح دهیدکه آب چگونه الکترولیز شده و $H_2$ و $O_2$ تولید می‌کند.

**۱۲-۲-۵** در شکل ۱۲-۲-۱، به‌جای مس طلا و به‌جای روی قلع قرار گرفته است. براساس واکنشهای نیم‌پیل جدول ۱۲-۲-۱، وزن قلع‌خورده‌شده درهرساعت بیشتراست یا وزن طلایی که رسوب داده می‌شود؟

جواب: طلا ۱۰ w/o بیشتر است.

**۱۲-۳-۱** پیل شکل ۱۲-۲-۱ الکترولیتهایی حاوی ۳g روی و ۲۳g مس در هرلیتر دارد. ولتاژ پیل چقدر است؟

جواب: $-1{,}13\, V$

**۱۲-۳-۲** سیمی آهنی در فاضلابی معدنی قرار می‌گیرد که غلظت یون $Fe^{2+}$ در آن از $0{,}09\, M$ در یك‌سر (A) تا $0{,}005\, M$ در سر دیگر (B) تغییر می‌کند. الف) کدام سر آن آند است؟ ب) اختلاف پتانسیل بین‌دوسر آن چقدر است؟

**۱۲-۳-۳** دوقطعه فلز، یکی مس و دیگری درآب‌دریا قرار می‌گیرند و توسط سیم مسی به‌هم مربوط می‌شوند. بانوشتن واکنشهای نیم‌پیل الف) برای آند؛ و ب) برای کاتد و همچنین بامشخص‌کردن (ج) جهت جریان الکترون در سیم و (د) جهت «جریان برق» در الکترولیت، پیل گالوانی‌را مشخص‌کنید؛ (ه) برای‌آنکه روی قطبیت را تغییردهد به‌جای مس ازچه فلزی می‌توان استفاده کرد؟

**۱۲-۳-۴** روابط (۱۲-۱-۱)، (۱۲-۲-۴)، (۱۲-۲-۷)، (۱۲-۲-۸)، (۱۲-۲-۹) و خوردگی آهن‌را درنظر بگیرید. اگر واکنش کاتدی صورت گیرد کدامیك از این‌روابط واکنش کاتدی مربوط به‌آن است، درصورتی‌که: الف) آهن در ساحل‌دریا در آب قرار داشته باشد؟ ب) آهن در محلول سولفات‌مس قرار داشته باشد؟ ج) آهن به‌صورت قوطی کنسروی حاوی نوشیدنی کربنات‌شده باشد؟ د) آهن به‌صورت تیغهٔ میل زنگ زده‌ای باشد؟ ه) آهن به‌صورت سپرخراش‌خوردهٔ اتومبیلی باشد؟

**۱۲-۳-۵** ازمیان هریك از جفتهای زیر آند را انتخاب کنید. (بجز عواملی که ذکر شده، سایرعوامل برای دوعضو هرجفت یکسان‌است.) الف) مس درمقابل‌نقره ب) مس درمقابل آهن ج) روی (در محلول M-۱ر۰) در مقابل روی (در محلول M-۲ر۰) د) دانه‌های نیکل در مقابل مرزدانه‌های نیکل ه) محصول روکش‌شده با نیکل در مقابل الکترود نیکل ☐ و) فلز اثرناپذیرشده درمقابل‌فلز فعال شده ز) آلومینیم تحت‌تنش قرارگرفته درمقابل آلومینیم بدون تنش.

☐ **۱۲-۴-۱** خوردگی از نوع حفره‌ای‌شدن موضعی بدنهٔ قایقی آلومینیمی را پس از ۱۲ ماه ماندن درآب‌دریا سوراخ کرده است. ضخامت ورق آلومینیم ۱ر۱ میلی‌متر است. قطر متوسط سوراخ ۲ر۰ میلی‌متر است. الف) درهرثانیه چنداتم از حفره جدا شده‌است؟ ب) چگالی جریان خوردگی چقدر بوده است؟

جواب: الف) $۶ر۶ \times ۱۰^{۱۰}/\text{sec}$ ب) $۱\ \text{A/m}^2$

☐ **۱۲-۴-۲** اگر چگالی جریان $\text{A/m}^2$ ۱ر۰ باشد، چه مدت طول می‌کشد تا به‌طور متوسط mm ۱ر۰ از سطح آلومینیم خورده شود؟

☐ **۱۲-۴-۳** چگالی متوسط جریان $۱۰^2\text{amp/m}^2$ برای ایجاد پوشش آندی شده روی آلومینیم به‌کارمی‌رود. پوشش $Al_2O_3$ ‏۱ μm ضخامت دارد. مدت‌زمان لازم چقدر است؟

جواب: ۲۱۵ sec

# ۱۳

## چدن، بتن، چوب و مواد چندسازه

**(مواد پرمصرف و پیچیده‌تر)**

عنوان‌این‌فصل را چهارنمونه ازمواد پرمصرف درمهندسی و طراحی فنی تشکیل می‌دهد. چدن قدمت تاریخی دارد و ارزانترین مادهٔفلزی است. ضمناً کاربردهای بسیاری نیز دارد، از جمله آنکه ۸۰ درصد از اجزای موتور اتومبیل از این‌ماده ساخته شده است. وزن بتن تولید شده در هرسال از هرمادهٔ مهندسی دیگر بیشتر است (البته اگر کاربرد فنی هـوا، سوخت وآب را درنظر نگیریم.) چوب، در این روزهای کمبود مواد، قادر است جانشین مـواد دیگر شود و این مزیت را دارد که به‌آسانی و با کمترین انرژی قابل‌تغییرشکل است. مواد چندسازه نمونهٔ مشهودی ازمواد «سفارشی» یا «مهندسی»اند که‌دربعضی موارد «مواد فردا» نامیده می‌شوند.

هیچیك ازمواد بالا ساده نیستند ولی هریك نمونه‌ای‌انـد از اینکه چگونه خواص به‌ساختارمربوط می‌شود. این‌فصل آخر می‌تواند به‌جمعبندی مفهوم ارتباط بین ساختار وخواص کمك کند و دانشجویانی را که بعدها درموردآنها درسهای تخصصی‌تری نخواهند گرفت باتکنولوژی این‌مواد آشنا سازد.

محتوای فصل ۱۳ بهمرادی که درسرفصل آمده محدود می‌شود، ولی انواع دیگر مواد مانند خاك، فولادهای ابزار، آجر، کاغذ، و سفالینه‌ها را نیز می‌تواند شامل شود. هریك ازاین مـواد نسبتاً پیچیده‌اند ولی مـی‌توانند براساس ساختار داخلی تحلیل شوند.

## هدف از مطالعه

یك یاچند ماده از مواد بالارا انتخاب کنید. اگر بین مواد انتخابی شما چدن وجود دارد:

۱. تشخیص بین انواع مختلف چدن برمبنای میکروساختار.

۲. توانایی در تشریح جزئیات چگونگی تولید انواع فریتی وپرلیتی، چدن خاکستری، کروی، و چکش‌خوار با کمك نمودار فازی Fe–C.

۳. ربط‌دادن خواص مهم به‌ماهیت میکروساختار آن.

اگر بین مواد انتخابی شما بتن وجود دارد،

۴. تشخیص جنبه‌هایی که مشخص‌کنندهٔ فشردگی ذرات و خرده‌سنگهاست.

۵. شناخت ماهیت کلی فرایند سخت‌کردن سیمان پرتلند.

۶. توانایی محاسبهٔ نسبت مخلوطهای بتن.

۷. تشریح عواملی که موجب شکست بتن می‌شوند.

اگر بین مواد انتخابی شما چوب وجود دارد،

۸. آشناشدن با واحدهای بیولوژیکی که در ساختارچوب یافت می‌شود.

۹. ربط‌دادن چندسویی ساختار چوب به‌خواص جهتدار آن.

۱۰. تشریح روشهایی که درآنها چوب برای بهبود خواص و یاکار مرغوبتر می‌شود.

اگر درمیان مواد انتخابی شما مواد چندسازه وجود دارد،

۱۱. آشناشدن با انواع مـواد چندسازه به‌غیراز بتن مسلح و پلاستیکهـای تقویت‌شده با رشته‌های شیشه‌ای که‌ذکرآن‌رفت، مثلا فولادهایی که پوشش شیشه‌ای دارند، مایلار[1] با پوششی از آلومینیم و شیشه‌ای که لایه‌هایی از پلاستیك دارد.

---

۱. نوعی پلاستیك قوی و شفاف.

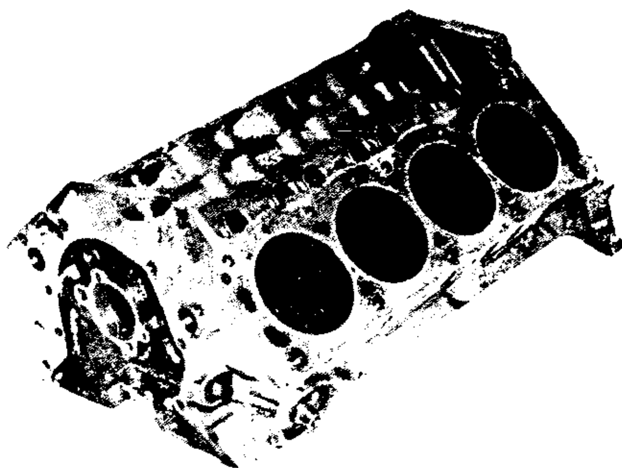
۱۲. تشخیص نقش مرز بین سطوح اجزا در ایجاد مادهٔ چند سازهٔ همدوس

۱۳. آشناساختن شما بـا قواعد مخلوط که درمورد مادهٔ چندسازهٔ ساده به‌کار می‌رود و درمورد آنها می‌توان خصوصیات هندسی تقویت‌کننده و زمینه را تعریف کرد.

## ۱۳-۱ چدنها

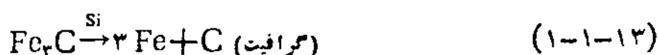
چدنها دراصل آلیاژ اوتکتیک آهن و کربن‌اند، بنابراین نقطهٔ ذوب آنها نسبتاً پایین است (۲۲۰۰°F یا ۱۲۰۰°C~). پایین بودن نقطهٔ ذوب مزیت آنهاست، زیرا به‌آسانی ذوب می‌شوند و به‌سوخت کمتر و کوره‌ای بـا روش کار ساده‌تر نیاز دارند. همچنین فلز مذاب به‌آسانی، قـالب پیچیده را کاملا پر مـی‌کند. این ویژگیها سبب ارزانی مـاده می‌شود و تسهیلات قابل‌ملاحظه‌ای در طراحی محصول فراهم می‌آورد (شکل ۱۳-۱-۱).

چدنها از آلیاژهای اوتکتیک‌ساده‌ای‌که شرح داده‌شد پیچیده‌ترند. مثلا بیشتر چدنها ۱٪ تا ۳٪ سیلیسیم دارند. این تاحدی به‌سبب آن است‌که سیلیسیم در فرایند تولید با آهن باقی می‌مـاند و برای جداسازی آن اقدامـات بیشتری لازم است. ولی نقش سیلیسیم در محصول نهایی مهمتر است. در درجهٔ اول، سیلیسیم استحکام فریت موجود در چدن را بالا مـی‌برد. در درجهٔ دوم، بـاوجود سیلیسیم، ترکیب اوتکتیکی بانقطهٔ ذوب پایین حـاوی ۳ر۵٪ — ۲٪ کربن به‌جای ۳ر۴٪ به‌دست‌می‌آیدکه درشکل ۹-۷-۱ دیده می‌شود. بالاخره



**شکل ۱۳-۱-۱** بلوك موتورچـدنی (V-۸). چدن نه‌تنها یکی‌از فراوانترین و ارزانترین آلیاژهـاست بلکـه قابل ریخته‌گری بـه‌قطعات پیچیده نیزهست. بنابراین قطعات چدنی قبل‌از جمع‌کردن موتورنهایی (شکل۱-۱-۱) به‌حداقل ماشینکاری نیاز دارند.

سیلیسیم موجب تجزیهٔ کاربید به آهن و گرافیت می‌شود



$$Fe_3C \xrightarrow{Si} 3\,Fe + C\ (\text{گرافیت}) \qquad (۱۳-۱-۱)$$

**گرافیتی‌کردن.** واکنش بالا در چدن، گرافیت تولید می‌کند، زیرا آهن کاربید، $Fe_3C$، در حقیقت پایدار نیست و فقط نیم پایدار است. درصورت وجود سیلیسیم و با قراردادن آن در دمای بالا ناپایداری آن شدت می‌گیرد.*

ازآنجاکه چدن گرافیتی می‌شود، باید به‌جای نمودار $Fe-Fe_3C$ نمودار فازی $Fe-C$ را به‌کار برد. این کار درشکل ۱۳-۱-۲ انجام شده‌است. خوشبختانه اختلاف بسیار کم‌است و فقط یك‌تغییر مهم وجود دارد؛ گرافیت به‌جای $Fe_3C$ قرار می‌گیرد! بنابراین در $400°C$، مقدار فریت درچدن حاوی ۳٫۵٪ کربن، برابر است با

$$\alpha = \frac{۱۰۰ - ۳٫۵}{۱۰۰ - \sim ۰} = ۰٫۹۶۵$$

و نه

$$\alpha = \frac{۶٫۷ - ۳٫۵}{۶٫۷ - \sim ۰} = ۰٫۴۸$$

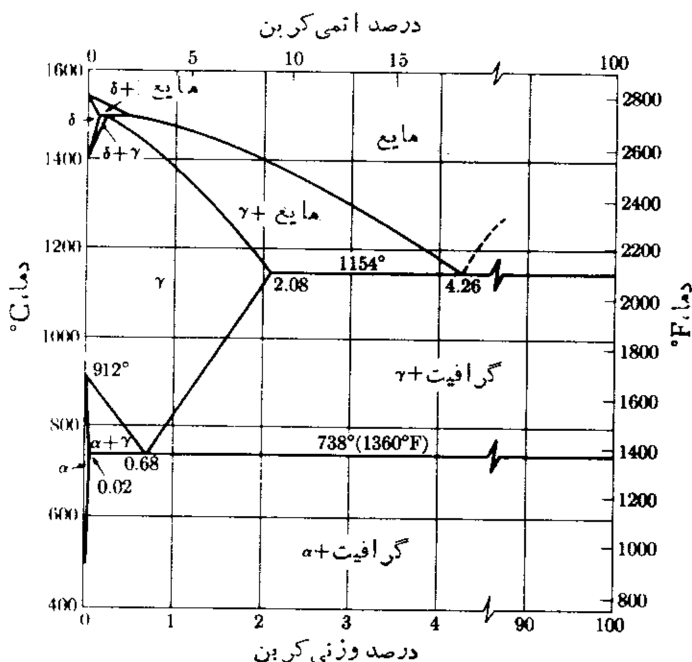
اولی ۱۰۰٪ از کربن را به‌صورت ترکیب گرافیت به‌کار می‌برد؛ دومی ۶٫۷٪ از کربن را به‌صورت ترکیب $Fe_3C$ درنظر می‌گیرد.

**چدن خاکستری.** چدنی‌که مقدار سیلیسیم آن بالا باشد ($\sim ۲\%\ Si$) سریعاً گرافیتی‌می‌شود به‌طوری‌که $Fe_3C$ هرگز تشکیل نمی‌شود پوسته‌های گرافیتی درحین انجماد فلز تشکیل می‌شوند. این امر درشکل ۱۳-۱-۳ دیده می‌شود. دراینجا این پوسته‌های گرافیتی را در مقطع دوبعدی فاز صیقل داده شده می‌بینیم. وقتی‌که این‌فلز در اثر کشش می‌شکند، مسیر

---

* قبلا بافازهای‌نیم‌پایدار برخورد کرده‌ایم مثلا تصورمی‌شود که الماس «برای همیشه» پایدار است ولی اگر به‌آن فرصتی داده شود به‌گرافیت تبدیل می‌شود. الماس فقط وقتی پایدار است که در فشار و دمای بالا قرارگرفته باشد. همچنین مارتنزیت و شیشه دوفاز نیم پایدارند. مارتنزیت در اثر بازپخت به ($\alpha + \bar{C}$) تبدیل می‌شود و شیشه اگر فرصتی‌بدان داده‌شود بلورین خواهد شد. مسلماً زمان لازم برای این‌کار در دمای $20°C$ تقریباً بینهایت است.

نمودارهای شکل ۹-۷-۱ و ۹-۷-۳ را به‌کار بردیم زیرا درشرایط عادی کاربرد فولاد ($Si$ کم و زمان کوتاه یا متوسط گرمایش)، گرافیتی شدن دیده نمی‌شود. بنابراین، فاز حاوی کربن در میکروساختار فولادها $Fe_3C$ است‌که برخواص آنها نیز اثر می‌گذارد.




**شکل ۱۳-۱-۲** نمودار فازی Fe–C. نمودار فازی $Fe–Fe_3C$ (شکل ۹-۷-۱) در حقیقت نمودار تعادلی نیست، زیرا $Fe_3C$ عاقبت به آهن و گرافیت تجزیه می‌شود، به‌ویژه در صورتی که چدن کربن بیشتری داشته باشد تنها تفاوت اساسی بین این نمودار و شکل ۹-۷-۱ این است که در آن طرف منحنیهای حدحلالیت کربن در فریت و کربن در استنیت، گرافیت به‌صورت فاز پرکربن وجود دارد.

شکست از پوسته‌ای به‌پوستهٔ دیگر پیشروی می‌کند. زیرا گرافیت که شبیه به‌میکاست در کشش بسیار ضعیف است پس درصد خیلی بالایی از سطح شکسته شده، گرافیت است و به‌ظاهر خاکستری است. بنابراین چدن خاکستری نامیده می‌شود.

انعطاف‌پذیری چدن تقریباً قابل اغماض است زیرا پوسته‌های گرافیتی در آن موجودند، و ارزانی، مزیت آن است. علاوه براین باوجود این پوسته‌های گرافیتی، چدن خاکستری انرژی ارتعاشی را بسیار خوب جذب می‌کند. در اصطلاح مهندسی لرزه میرایی آن بالاست. بنابراین، این نوع فلز به‌عنوان مادهٔ اصلی ماشین ابزار و دستگاههای سنگین کاربرد وسیعی یافته است (شکل ۱۳-۱-۴).

چدن خاکستری به‌روشهای مختلف عملیات گرمایی می‌شود تا میکروساختار پرلیتی، فریتی، مارتنزیتی و بینیتی در فلز ایجاد شود. مثلا اگر چدن خاکستری را تا تقریباً $750°C$ ($1380°F$) گرم کنیم، فازهای حاصل استنیت ($C$ ۰٫۷۵٪) و گرافیت خواهند بود. تقریباً آهسته سرد کردن آن، که طبق شکل ۱۰-۱-۹ شرح داده شد، از استنیت، پرلیت به‌وجود



**شکل ۱۳-۱-۳** چدن خاکستری، بزرگنمایی ۱۰۰. کربن به‌صورت پوسته‌های گرافیتی وجود دارد. اگر مقدار کربن زیاد باشد ترکیب اوتکتیك تشکیل می‌شود که ریخته‌گری آن‌ساده ولی استحکام و انعطاف‌پذیریش از فولادهای پرکربن کمتراست.

می‌آورد. کاربید از گرافیت سریعتر تشکیل می‌شود زیرا به‌وسعت نفوذکمتری نیاز دارد، به‌ویژه $(\alpha+\overline{C})$ بدون‌نفوذ اساسی آهن می‌تواند تشکیل شود. برعکس، نواحی گرافیتی شده درجسم جامد باید کاملا از آهن تهی شود.

آب‌دادن‌ازدمای ۷۵۰°C تا دماهای‌پایین، از استنیت، مارتنزیت به‌وجود می‌آورد. از طرف دیگر آب‌دادن از ۷۵۰°C تا دماهای متوسط وسپس بازپخت استنیتی (بخش ۱۱-۵) بینیت تولید می‌کند. دراین حالتها بیش‌از مقداری‌که از اطلاعات قبلی ما درمورد پرلیت، مارتنزیت و بینیت انتظار می‌رود، استحکام و سختی چدن خاکستری پرلیتی، چدن خاکستری بینیتی (جدول ۱۳-۱-۱) بایکدیگر تفاوت دارند.

اگر سیلیسیم‌اندکی‌افزایش‌یابد تا گرافیتی‌شدن کامل چدن در ۷۰۰°C(~۱۰۰۰°F) تسهیل شود، میکروساختار دیگری وجود خواهد داشت‌که عبارت‌است از فریت وگرافیت. این چدن خاکستری فریتی چدنی نرم و قابل ماشینکاری است و احتیاجات بسیاری را باهزینهٔ کم برطرف‌می‌کند، برای اجتناب ازتشکیل‌کاربید بایدآن‌را از ۷۰۰°C به‌آهستگی سرد کرد.



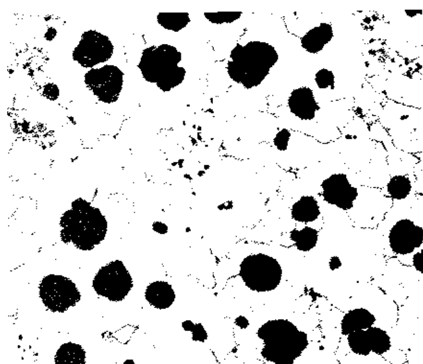

**شکل ۱۳-۱-۴** لرزه میرایی نسبی فولاد و چدن. ارتعاشات در چدن بسیار سریعتر روبه‌زوال می‌گذارند، زیرا پوسته‌های گرافیتی انرژی ارتعاشی را جذب می‌کنند.

**چدن کروی (انعطاف‌پذیر).** آزمایشهای دقیق نشان داد که اگر مقدار کمی منیزیم یا سریم به‌فلز مذاب اضافه کنیم به‌جای میکروساختار چدنهایی که به‌آسانی گرافیتی می‌شوند (شکل ۱۳-۱-۳) می‌توان آنچه راکه درشکل ۱۳-۱-۵ دیده می‌شود به‌دست آورد. کره‌های گرافیتی (یا ذرات کروی) حاصل به‌طور مؤثری برانعطاف‌پذیری چدن اثر می‌گذارد. (جدول ۱۳-۱-۱)، در حالی که چدن خاکستری معمولی اصلا انعطاف‌پذیر نیست، این چدن‌کروی می‌تواند ۱۰٪-۲۰٪ ازدیاد طول داشته باشد. اگر چه توضیح این متغیر میکروساختار پیچیده‌است، ولی در عمل آثار آن‌فوق‌العاده است، زیرا درکاربردهایی مانند میل‌لنگ، که درآن شکست ترد موجب فاجعه می‌شود، استفاده از چدن را ممکن می‌سازد.

چدن کروی را مثل چدن‌خاکستری می‌توان با عملیات گرمایی، فریتی یا پرلیتی کرد یا مارتنزیت بازپخت‌شده درآن به‌وجود آورد. اولی انعطاف‌پذیرتر است و دومی محصول ریخته شدهٔ فوق‌العاده محکمی به‌وجود می‌آورد (جدول ۱۳-۱-۱).

**چدن چکش‌خوار.** دیدیم که‌چدن با ۳٪-۵ر۳٪ کربن و ۲٪-۵ر۲٪ سیلیسیم‌فوراً گرافیتی می‌شود. فولادها نوعاً (۲۵ر۰٪ Si و C ۱٪ >) در شرایط عادی گرافیتی نمی‌شوند. همان‌طورکه انتظار می‌رود ترکیبات میانی به‌صورت بینابینی رفتار می‌کنند، ولی کاربرد محصول تاحد زیادی به‌چگونگی تنظیم ترکیب آن، سرعت سردکردن و عملیات گرمایی بعدی بستگی دارد. مثلا چدن با ۲۵ر۲٪ کربن و ۱٪ سیلیسیم اگر سریع منجمد شود یعنی درحین‌انجماد فاز نیم‌پایدار $Fe_3C$ تشکیل‌شود و فرصتی برای گرافیتی‌شدن پس‌ازانجماد به‌آن داده نشود، چدن‌سفید به‌وجود می‌آورد.

**چدن‌سفید.*** دربعضی قطعات مقاوم به‌سایش کاربردهایی یافته است، زیرا کاربید به‌مقدار زیاد (تقریباً ۳۰ درصد حجمی محصول)، کاملا در مقابل سایش مقاوم است. ولی اگر این فلز تابکاری شود و چدن چکش‌خوار به‌وجود آید کاربرد گسترده‌تری می‌یابد.



**شکل ۱۳-۱-۵** چدن‌کروی، ۱۰۰ ×. کربن به‌صورت‌کره‌های گرافیتی‌وجوددارد. برخلاف چدن خاکستری، چدن کروی انعطاف‌پذیر است (جدول ۱۳-۱-۲). گرافیت در حین انجماد هم در چدن خاکستری و هم درچدن کروی تشکیل می‌شود.

* سطح مقطع شکست آن به‌جای خاکستری، سفید فلزی است.

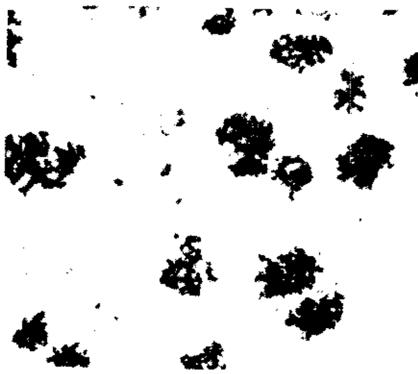
جدول ۱۳-۱-۱ خواص چدن آلیاژ نشده *

| چدن | نوع | کمینهٔ خواص مکانیکی $S_t$ | $S_y$ | ازدیاد طول (۵ cm) | کاربرد |
|---|---|---|---|---|---|
| خاکستری (۳ر۲ C-۲ Si) | پرلیتی | ۲۷۵ MPa | ۲۴۰ MPa | <%۱ | بدنهٔ موتور |
| | مارتنزیتی | ۵۵۰ | ۵۵۰ | صفر | سطوح سایشی |
| | بینیتی | ۵۵۰ | ۵۵۰ | صفر | میل بادامك |
| | فریتی* | ۱۷۲ | ۱۳۸ | <%۱ | لوله، پایهٔ ماشین |
| کروی ** (۵ر۳ C-۵ر۲ Si) | فریتی | ۴۱۳ MPa | ۲۷۵ MPa | ۱۸ | لوله |
| | پرلیتی | ۵۵۰ | ۳۸۰ | ۶ | میل لنگ |
| | مارتنزیت بازپخت شده | ۸۲۵ | ۶۲۰ | ۲ | قطعات مخصوص ماشین |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| چکش‌خوار (۲٫۲ C–۱ Si) | فریتی | ۳۶۵ MPa | ۲۲۰ MPa | ۱۸ | فلز آلات |
| | پرلیتی | ۴۵۰ | ۳۱۰ | ۱۰ | تجهیزات راه‌آهن |
| | مارتزیت بازپخت شده | ۷۰۰ | ۵۵۰ | ۲ | تجهیزات راه‌آهن |
| سفید (۳٫۵ C–۰٫۵ Si) | ریخته‌شده (پرلیتی) | ۲۷۵ MPa | ۲۷۵ MPa | صفر | محصولات مقاوم به‌سایش |

* معمولا چدن فریتی تقریباً ۳٫۵% کربن و ۲٫۵% سیلیسیم دارد.

** چدن انعطاف‌پذیر نیز نامیده می‌شود.



**شکل ۱۳-۱-۶** چدن چکش‌خوار، ۱۰۰ ×. کربن به‌صورت خوشه‌های گرافیت (کربن بازپخت شده) موجود است. درنتیجه نامیزان قابل توجهی انعطاف‌پذیر است (جدول ۱۳-۱-۲). خوشه‌های گرافیت توسط واکنش درحالت جامد، طبق روابط (۱۱-۱-۲) و (۱۱-۱-۳) تشکیل می‌شوند.

این مطلب در بخش ۱۱-۱ نیز ذکر شده‌است. با تابکاری چدن سفید، $Fe_3C$ تجزیه و به‌آهن و گرافیت تبدیل می‌شود. از آنجا که واکنش بدون وجود مایع صورت می‌گیرد، گرافیت حاصل نه‌پوسته‌ای شکل است (شکل ۱۳-۱-۳) و نه‌کروی (شکل ۱۳-۱-۵). بلکه به‌صورت «خوشه‌ای» در داخل فلز جامد رشد می‌کند (شکل ۱۳-۱-۶). این گرافیت مانند لبه‌های پوسته‌های گرافیت درمقیاس میکروسکوپی «ترک‌دوست» نیست بنابراین فلز تاحدی انعطاف‌پذیر باقی می‌ماند (جدول ۱۳-۱-۲) و همان‌طور که از اسمش پیداست از چدن خاکستری، چکش‌خوارتر است.

همان‌طور که از معادلات (۱۱-۱-۲) و (۱۱-۱-۳) برمی‌آید، می‌توان چدن چکش‌خوارفریتی یاچدن چکش‌خوار پرلیتی تولیدکرد. علاوه براین آب دادن و بازپخت مناسب می‌تواند به‌تولید قطعات ریختگی نسبتاً محکم و ارزانی منجر شود که در راه‌آهن و تجهیزات مشابه آن قابل‌استفاده باشد.

لازم است در طراحی به‌محدودیتی، که ویژهٔ چدن چکش‌خوار است توجه داشته باشیم. ازآنجاکه انجماد باید به‌حدکافی‌سریع انجام شود تا ابتدا چدن‌سفید تشکیل شود، این قطعات ریختگی نمی‌توانند مقطع ضخیم داشته باشند. در غیر این‌صورت درمدتی‌که

**جدول ۱۳-۱-۲** انعطاف‌پذیری آلیاژهای فریتی

| نوع | انعطاف‌پذیری<br>٪ازدیادطول (۵ cm) | شمارهٔ شکل |
|---|---|---|
| چدن فریتی | ۴۰-۵۰ | ۹-۸-۲(الف) |
| چدن فریتی کروی | ۱۵-۲۰ | ۱۳-۱-۵ |
| چدن فریتی چکش‌خوار | ۱۵-۲۰ | ۱۳-۱-۶ |
| چدن فریتی خاکستری | <۱ | ۱۳-۱-۳ |

برای انجماد لازم است پوسته‌هـای گرافیتی تشکیل خـواهد شد. بسته به‌مقدار سیلیسیم و ضریب رسانندگی گرمایی‌دیوارهٔ قالب، بیشینهٔ ضخامت قطعات ریختگی چدن چکش‌خوار معمولا به ۳۰mm–۲۰mm محدود می‌شود.

**مثال ۱۳-۱-۱** نمودار مقدار فریت و استنیت برحسب دمـا را برای چدن حاوی ۵ر۲٪ کربن، ۱٪ سیلیسیم و بقیه‌آهن، رسم کنید.

الف) برای چدن‌سفید؛ ب) برای چدن چکش‌خوار با کربن آزاد.

حل: سیلیسیم در فریت و استنیت حل می‌شود. بنا براین ترکیب آن را تقریباً برابر Fe–۲٫۵ C ۹۷٫۵ درنظر می گیریم.

الف) ازشکل ۹–۷–۱ که نمودار $Fe–Fe_3C$ است استفاده کنید.

در ۷۰۰°C (و پایینتر از آن) $\alpha=(۶٫۷-۲٫۵)/(۶٫۷-۰)=۰٫۶۳$

در ۸۰۰°C $\gamma=(۶٫۷-۲٫۵)/(۶٫۷-۱٫۰)=۰٫۷۴$

و غیره شکل ۱۳–۱–۷ را ببینید.

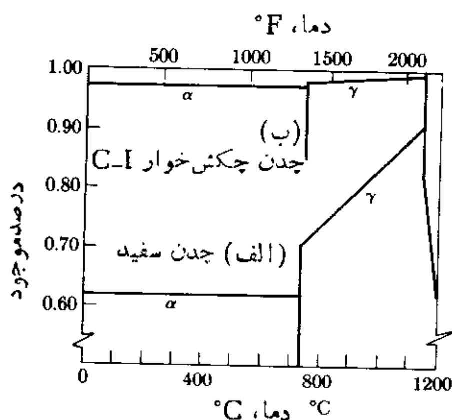
ب) ازشکل ۱۳–۱–۲ که نمودار Fe–C است استفاده کنید.

در ۷۰۰°C و پایینتر از آن $\alpha=(۱۰۰-۲٫۵)/(۱۰۰-۰)=۰٫۹۷۵$

در ۸۰۰°C $\gamma=(۱۰۰-۲٫۵)/(۱۰۰-۰٫۹۵)=۰٫۹۸۵$

و غیره شکل ۱۳–۱–۷ را ببینید.

توضیح. سیلیسیم مانند تمام‌عناصر، نقطهٔ‌اوتکتوئید را به‌نقطه‌ای با درصد کربن کمتر انتقال می‌دهد. (بخش ۹–۹) این امر حلالیت کربن در استنیت را تا حدی کاهش می‌دهد. بنابراین منحنیهای شکل ۱۳–۱–۷ برای γ اندکی بالاست. ▲




**شکل ۱۳-۱-۷** کسر فازهـا (چـدن بـا ۲٫۵٪ کربن). فازدوم در چدن سفید الف) کاربید است در دمـای زیر نقطـهٔاوتکتیك (شکل ۹–۷–۱). پس ازچکش‌خوارکردن؛ ب) فاز دوم زیر دمای اوتکتیك، گرافیت است (شکل ۱۳–۱–۲). (مثال۱۳–۱–۱ را ببینید.)

**مثال ۱۳-۱-۲** چگونگی عملیات گرمایی برای تولید چدن کروی حاوی مارتنزیت بازپخت شده ($۳C-۲Si-۹۵ Fe$) را بنویسید. چه عواملی باعث می‌شود که این عملیات با عملیات مشابه درمورد فولاد ۱۰۸۰ تفاوت کند؟

روش و توضیح.

الف) ذوب، $\sim ۱۳۰۰^{\circ}C$ ($\sim ۲۴۰۰^{\circ}F$) به‌فلز باید منیزیم (یا سریم) تلقیح شود تا درحین انجماد کره‌های گرافیتی تشکیل شوند. دمای ذوب آن از فولاد کمتر است، زیرا کربن بیشتری وجود دارد.

ب) استنیتی کردن، $۸۰۰^{\circ}C$ ($۱۴۷۵^{\circ}F$)، ازآنجا که ۲٪ سیلیسیم موجوداست، دمای اوتکتوئید و ترکیب آن به‌ترتیب $۷۷۵^{\circ}C$ و $\sim$٪۵۵C است (شکل ۹-۹-۱).

$$\text{استنیت } (\sim \%۰٫۵۵\,C) + \text{گرافیت } (\%۱۰۰\,C)$$

ج) آب‌دادن درروغن تا دمای محیط. ۲٪ سیلیسیم سختی‌پذیری فولاد را به‌طور محسوسی افزایش می‌دهد. بنابراین آب‌دادن در روغن امکانپذیر است واحتمال ترک‌خوردگی را کاهش می‌دهد، مارتنزیت ($\sim$٪۰٫۵۵C) + گرافیت (٪۱۰۰C).

د) بازپخت کردن درست مثل فولاد ۱۰۵۵.

$$\text{فریت (بدون C)} + \text{کاربید } (\%۶٫۷\,C) + \text{گرافیت } (\%۱۰۰\,C)$$

**مثال ۱۳-۱-۳** چگالیهای چدن سفید و چدن فریتی چکش‌خوار در مثال ۱۳-۱-۱ را با هم مقایسه کنید. با ٪۱ Si

$$\rho_{\alpha} = \sim ۷٫۸\ g/cm^{۳}$$

$$\rho_{Fe_۳C} = ۷٫۶\ g/cm^{۳}$$

$$\rho_{\text{گرافیت}} = \sim ۲٫۲\ g/cm^{۳} \qquad (\sim ۲٫۲\ Mg/m^{۳}\ \text{یا})$$

حل: مبنا: $۱۰۰\ g$ و با به‌کاربردن $g/cm^{۳}$.

چدن سفید، $۰٫۶۳\ \alpha$ و $۰٫۳۷\ Fe_۳C$ (مثال ۱۳-۱-۱)

و $$\frac{۶۳\ g\ \alpha}{۷٫۸\ g/cm^{۳}} = ۸٫۰۸\ cm^{۳}\alpha$$

و $$\frac{۳۷\ g\ Fe_۳C}{۷٫۶\ g/cm^{۳}} = ۴٫۸۷\ cm^{۳}Fe_۳C$$

$$\rho_{\text{چدن سفید}} = ۱۰۰\ g\ (۸٫۰۸ + ۴٫۸۷\ cm^{۳})$$

$$= ۷٫۷۲\ g/cm^۳ (\text{یا}\ ۷٫۷۲\ Mg/m^۳)$$

فریتی چکش‌خوار: ۰٫۹۷۵ $\alpha$ و ۰٫۰۲۵ گرافیت (مثال ۱۳-۱-۱)

و
$$\frac{۹۷٫۵\ g\ \alpha}{۷٫۸\ g/cm^۳} = ۱۲٫۵۰\ cm^۳\ \alpha$$

$$\frac{۲٫۵\ g\ \text{گرافیت}}{۲٫۲\ g/cm^۳} = ۱٫۱۴\ cm^۳\ \text{گرافیت}$$

$$\rho_{\text{چدن فریتی چکش‌خوار}} = \frac{۱۰۰\ g}{۱۲٫۵۰ + ۱٫۱۴\ cm^۳}$$

$$= ۷٫۳۳\ g/cm^۳ (\text{یا}\ ۷٫۳۳\ Mg/m^۳)$$

توضیح. درحین چکش‌خـوارکردن انبساط حجمی به‌وجود می‌آید کـه در کنترل فرایند باید درنظر گرفته شود. ▲

## □ ۱۳-۲ بتن (و محصولات مربوط به‌آن)

عموماً اطلاع داریم که سازه‌های مهندسی مثل ساختمانها، پلهـا و بزرگراهها را می‌توان از سنگریزه، ماسه وسیمان ساخت. محصول یکپارچهٔ حاصل بتن* نامیده‌می‌شود. مشخصات ویژهٔ بتن به‌ماهیت کلوخه و ماهیت خمیر** آب-سیمان مخلوط‌شده بـا آن و مسلماً به‌مقدار نسبی آنهـا بستگی دارد. به‌عبارت دیگر، خواص آن درست مـانند هر مادهٔ دیگر توسط ساختار داخلی آن تعیین می‌شود.

**کلوخه‌ها.** البته ماسه و سنگریزه باید مواد با دوامی مثل کوارتزیت، سنگ آهك خردشده یا بازالت باشند و بـاید استحکام آنها از استحکامی کـه در نهایت از بتن انتظار می‌رود بیشتر باشد. در غیر این‌صورت، اگر سنگ‌لوح (یا سنگ‌شکنندهٔ دیگری نظیر آن) وجود داشته باشد، در کلوخه شکستگی به‌وجود می‌آید، حتی اگر افزوده‌های سیمانی آن بهترین فرمـولبندی را داشته بـاشد. کدهـای بتن کیفیت کلوخه‌هـا را مشخص مـی‌کند. مثلا ASTM-C۸۸. علاوه براین اندازه‌گیری اندازهٔ کلوخه‌هـا نیز برای کار مهندس لازم است. این‌کار توسط آنالیز با سرند انجام می‌شود. معمولا دو مجموعه سرند برای آنالیز

---

* سیمان به‌ماده‌ای گفته می‌شود که برای چسبندگی بتن به‌کار می‌رود و نه به‌محصول نهایی.

** وقتی ۰٫۴ تا ۰٫۷ واحد (وزنی) آب با یك‌واحدسیمان مخلوط‌می‌شود. محصول ابتدا قوام خمیری دارد. بتن را می‌توان محلوط این خمیر با کلوخه‌ها درنظر گرفت. این‌خمیر اندك اندك توسط آبدارکردن سخت می‌شود.

با سرند به‌کار می‌رود (جدول ۱۳-۲-۱) که به‌طور کلی قابل‌مقایسه با یکدیگرند. برای شاخصهای بتن بیشتر مجموعهٔ امریکایی سرندهـا با انـدازه‌هـای مختلف بـه‌کار می‌رود.

**جدول ۱۳-۲-۱** مجموعه‌های سرند که در آنالیز ذرات به‌کار می‌رود (سوراخها)

| مجموعهٔ امریکایی | | مجموعهٔ تایلر | |
|---|---|---|---|
| ۱٫۵ | ۳۸ mm | ۱٫۵ | ۳۸ mm |
| ۱ | ۲۶٫۷ | ۱ | ۲۵٫۴ |
| $\frac{۳}{۴}$ | ۱۸٫۹ | $\frac{۳}{۴}$ | ۱۹٫۱ |
| $\frac{۱}{۲}$ | ۱۳٫۳ | $\frac{۱}{۲}$ | ۱۲٫۷ |
| $\frac{۳}{۸}$ | ۹٫۴ | $\frac{۳}{۸}$ | ۹٫۵ |
| شماره ۳ | ۶٫۷ | | |
| ۴ | ۴٫۷ | شماره ۴ | ۴٫۷۵ |
| ۶ | ۳٫۳ | | |
| ۸ | ۲٫۳۶ | ۸ | ۲٫۳۸ |
| ۱۰ | ۱٫۶۶ | | |
| ۱۴ | ۱٫۱۸ | ۱۶ | ۱٫۱۹ |
| ۲۰ | ۰٫۸۳ | | |
| ۲۸ | ۰٫۵۹ | ۳۰ | ۰٫۵۹ |
| ۳۵ | ۰٫۴۲ | | |
| ۴۸ | ۰٫۲۹۵ | ۵۰ | ۰٫۲۹۷ |
| ۶۵ | ۰٫۲۰۸ | | |
| ۱۰۰ | ۰٫۱۴۷ * | ۱۰۰ | ۰٫۱۵۰ |

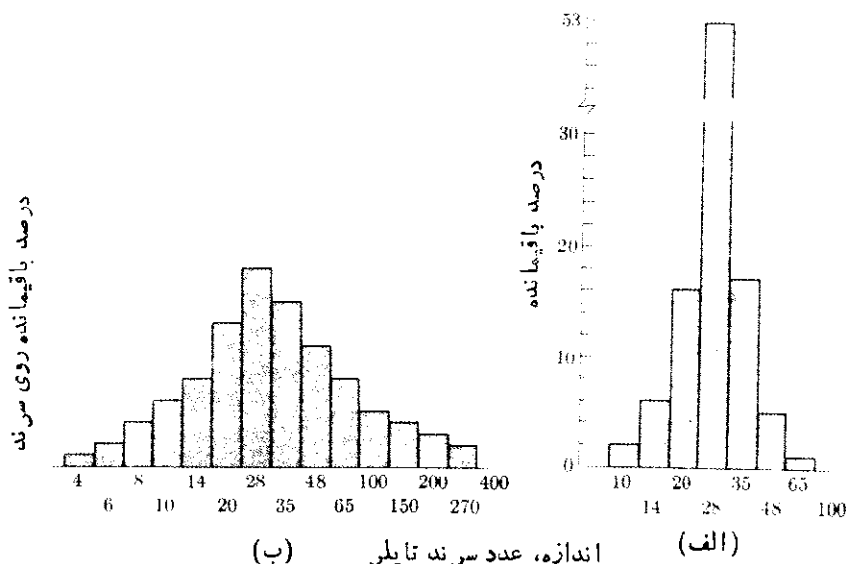
* مجموعه‌ها تاشمارهٔ ۴۰۰ با سوراخ ۰٫۰۳۷ میلی‌متر ادامـه دارد و برمبنای $\sqrt{۲}$ تغییر می‌کند.

مجموعه‌های تایلر که برمبنای $\sqrt{2}$ تنظیم شده است بیشتر درصنعت سرامیک کاربرد دارد.

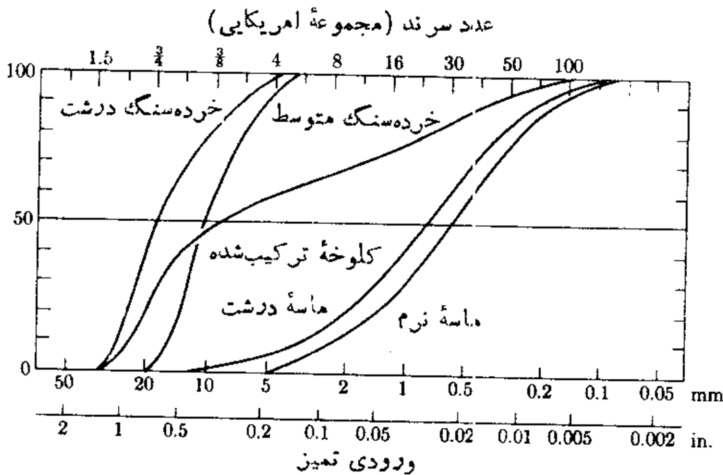
میانگین اندازهٔ ذرات تنها از اهمیت محدودی برخوردار است. مثلا محدودهٔ توزیع ذرات می‌تواند بسیار باریک باشد مثل انواع ماسه‌های ساحلی، یا خیلی پهن باشد مثل ماسهٔ رودخانه ولی میانگین اندازهٔ آنها یکی باشد (شکل ۱۳ــ۲ــ۱). مهندسان معمولا به‌نسبت کمی موادی که روی سرندهای متوالی باقی می‌مانند توجه نشان می‌دهند. چندین آنالیز از این نوع درشکل ۱۳ــ۲ــ۲ دیده می‌شود.

چگالی فشردگی و تخلخل نیز مهم‌اند. شکل ۱۳ــ۲ــ۳ نشاندهندهٔ چند تقسیم‌فرعی درحجم است که درمقدار آب و یا خمیرسیمانی که می‌تواند باکلوخه پیوند تشکیل دهد، اثر دارند. منفذهای بسته (داخلی) نفوذناپذیرند. درکلوخه‌هــای مصنوعی سبک‌وزن و در بعضی کلوخه‌های بازالتی خردشده به‌این‌نوع منفذها برمی‌خوریم. منفذهای باز حفره‌های نفوذپذیرند. این منفذها ترکهای مویی‌شیارها و بی‌نظمیهای زاویه‌ای شکل ذرات کلوخه را شامل مــی‌شوند. علاوه‌براین در میان ماسه، سنگریزه و غیره ممکن است مقدار زیادی تخلخل بین ذره‌ای که به‌صورت منفذهای باز است وجود داشته باشد.

این منفذها سبب تعریف چندنوع حجم می‌شوند. حجم حقیقی حجم ذاتی ماده‌است. حجم ظــاهری مجموع حجمهای حقیقی و حجم منفذهــای بسته است. حجم انباشتی نه‌تنها شامل حجم منفذهای بسته است (و حجم حقیقی) بلکه منفذهــای باز را نیز شامــل می‌شود بنابراین برای تعریف حجم کل باید مبنای خود را تعریف کنیم. اگر فقط ذرات کلوخه‌ها




**شکل ۱۳ــ۲ــ۱** توزیع اندازهٔ ذرات. الف) درجه‌بندی باریک مثل ماسهٔ ساحلی؛ ب) درجه‌بندی پهن مثل ماسهٔ رودخانه.



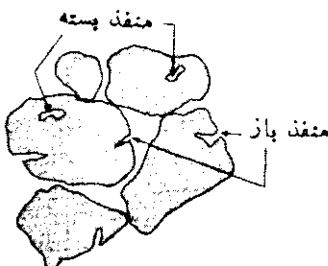

**شکل ۱۳-۲-۲** آنالیز انواع کلوخههایی که برای مخلوطهای بتن بهکار میرود. کلوخهٔ مرکب مخلوطی از سنگریزهٔ درشت (۶۰٪) و ماسه (۴۰٪) است. این ترکیب فضاها را کاملتر از سنگریزهٔ تنها یا ماسهٔ تنها پرمیکند.

در نظر گرفته میشوند، منفذهای باز بهترکهای کوچك و ترکهای مویی محدود میشوند. اگر مبنای ما برای حمل و نقل تودهٔ مواد باشد، حجمکل باید شامل مقدار نسبتاً زیاد تخلخلهای بینذرات نیز بشود.

این حجمها موجب بهوجودآمدن دونوع تخلخل یعنی حقیقی (یا کل) و ظاهری (یا باز) میشود

$$\text{تخلخل کل} = \frac{\text{حجم منفذهای باز} + \text{حجم منفذهای بسته}}{\text{حجم کل}} \qquad (۱۳-۲-۱)$$

$$\text{تخلخل ظاهری} = \frac{\text{حجم منفذهای باز}}{\text{حجم کل}} \qquad (۱۳-۲-۲)$$




**شکل ۱۳-۲-۳** فضای منفذ (طرحواره). منفذهای بسته، منفذهای داخلی و بنابراین نفوذناپذیرند. منفذهای باز، منفذهای نفوذپذیرند منفذهای باز شامل فضای بین ذرات (تخلخل بین ذرات). بهعلاوه ترکهای کوچك و ترکهایمویی است که بهداخل ذرات کلوخهها پیشروی میکنند.

در هرصورت، باید مبنای حجم کل را تعریف کنیم، چه حجم ذرات کلوخه باشد و چه حجمی که حفره‌های پرنشده بین ذرات کلوخه را شامل شود.

سه چگالی اصلی نیز وجود دارد

$$\text{چگالی حقیقی} = \frac{\text{جرم}}{\text{حجم حقیقی}} \qquad (۱۳-۲-۳)$$

$$\text{چگالی ظاهری} = \frac{\text{جرم}}{\text{حجم ظاهری}} \qquad (۱۳-۲-۴)$$

$$= \frac{\text{جرم}}{\text{حجم حقیقی} + \text{حجم منفذهای بسته}}$$

$$= \frac{\text{جرم}}{\text{حجم کل} - \text{حجم منفذهای باز}}$$

$$\text{چگالی انباشتی} = \frac{\text{جرم}}{\text{حجم کل}} \qquad (۱۳-۲-۵)$$

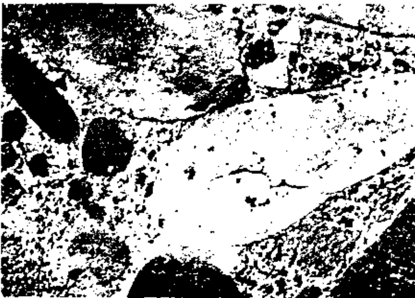
دراینجا باز باید مبنای خود را برای حجم کل تعریف کنیم و معین کنیم که آیا فقط کلوخه را درنظر می‌گیریم یا فضای موجود بین ذرات، که با مواد توده همراه‌اند، را نیز درنظر داریم.

**سیمان.** اساساً استحکام خمیر سخت‌شدهٔ سیمان در آب استحکام بتن را تثبیت می‌کند زیرا دریك کلوخهٔ محکم هرنوع شکستی بین ماسه و یا ذرات سنگی صورت می‌گیرد. بنابراین اصولاً راهی که فقط از مخلوط سیمان و آب ایجاد شده است می‌تواند به‌همان استحکامی باشد که وقتی مخلوط کلوخه نیز داشته‌باشد. ولی هزینهٔ آن بسیار گزاف خواهد بود. بنابراین مخلوط سیمان و آب با موادکلوخه‌ای ارزانتر و قویتر، «رقیق» می‌شود.

درحقیقت بتن حاوی سنگریزه یا سنگ‌خرد شده همراه با ماسه، پرکنندهٔ فضاهای بین آنهاست، در این حالت سیمان و آب فضای بین دانه‌های ماسه را پرمی‌کنند. درعمل مقداری ماسهٔ اضافی نیز برای اطمینان از پرشدن‌کامل فضای بین سنگریزه‌ها لازم است (شکل ۱۳-۲-۴) همچنین، تقریباً ۱۰ درصد خمیرسیمان بیشتراز مقدار نظری‌آن، برای فضای بین دانه‌های ماسه لازم است. در غیر این‌صورت اگر مخلوط‌کردن به‌طور کامل انجام نشود ممکن است تعدادی حفرهٔ موضعی باقی بماند.

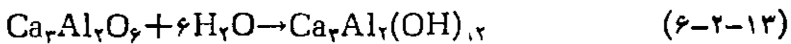
**آبدارکردن سیمان.** سیمانی که تقریباً درتمام بتنها به‌کار می‌رود سیمان پرتلند* نامیده

* اولین بار در حدود قرن‌هیجدهم در جزیرهٔ پرتلند ساخته شد.

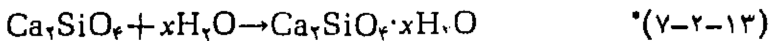


**شکل ۱۳-۲-۴**-سطح مقطع بتن (۱٫۵ ×). فضای بین سنگریزه‌ها با ماسه پرشده است. فضای بین ماسه‌ها با خمیرسیمان پرتلند آبدار پرشده است.

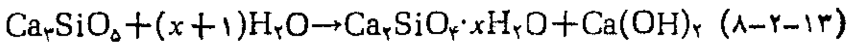
می‌شود و این‌ماده‌اصولاً مخلوطی از کلسیم سیلیکاتها و کلسیم آلومینات‌است که درحضور آب، آبدار شده است.



$$Ca_3Al_2O_6+6H_2O \rightarrow Ca_3Al_2(OH)_{12} \qquad (۶-۲-۱۳)$$



$$Ca_2SiO_4+xH_2O \rightarrow Ca_2SiO_4 \cdot xH_2O \qquad (۷-۲-۱۳)^*$$



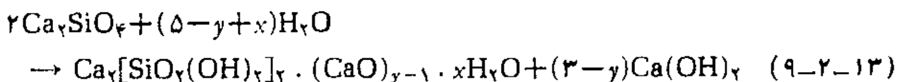
$$Ca_3SiO_5+(x+1)H_2O \rightarrow Ca_2SiO_4 \cdot xH_2O+Ca(OH)_2 \qquad (۸-۲-۱۳)$$

در هرصورت محصول آبدار نسبت به‌سیمان اولیه حلالیت کمتری درآب دارد. بنابراین درصورت‌آب واکنشهای فوق یکی از واکنشهای حل و رسوب مجدد است.

هریك ازاین واکنشها تأکیدی است براین مطلب کـه سیمان بـا خشك‌کردن سخت نمی‌شود. بلکه با واکنش شیمیایی آبدارکردن سخت می‌شود، درحقیقت لازم است بتن را مرطوب‌نگه‌داشت تا از خودگیریِ صحیح آن‌اطمینان حاصل‌شود. واکنشهای آبدارکردنی که در بالا شرح داده‌شد مطابق شکل ۱۳-۲-۵ گرمازا هستند. اگر لازم باشدکـه بتن را در دماهایی که اندکی زیر نقطهٔ انجماد آب است بریزند، مهندسان در هوای سرد ازاین خاصیت بهره‌می‌گیرند. برعکس گرمای حاصل ازآبدارکردن درهنگامی که‌بتن درسازه‌های پرحجمی مثل سد ریخته می‌شود، مسئله‌ای به‌حساب می‌آید. دراین شرایط فوق‌العاده، لازم است به‌طورمخصوصی آن‌را سردکرد و از لوله‌هایی‌که در داخل‌آن کارگذاشته شده است خنك‌کننده‌ای عبور داد، این لوله‌ها درمحل باقی خواهندماند و بعداً به‌عنوان تقویت‌کننده عمل خواهند کرد.

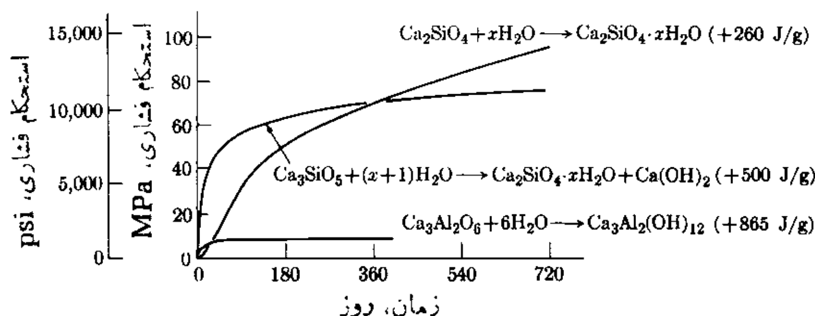
---

* صحیحتر است که این واکنش به‌صورت زیر نوشته شود



$$2Ca_2SiO_4+(5-y+x)H_2O \rightarrow Ca_2[SiO_2(OH)_2]_2 \cdot (CaO)_{y-1} \cdot xH_2O+(3-y)Ca(OH)_2 \qquad (۹-۲-۱۳)$$

دراینجا $x$ با فشار جزئی آب تغیر می‌کند و $y$ تقریباً ۲٫۳ است. رابطهٔ (۱۳-۲-۸) را نیز می‌توان مشابه همین تعریف کرد.




**شکل ۱۳-۲-۵** آبدار کردن و محکم‌شدن سیمان (ترکیبات سیمان پرتلند). برای افزایش استحکام، باید آب وجود داشته باشد تا آبدار شود. بتن پساختاشدن خود را نمی‌گیرد. همان‌طور که گفته‌شد درحین آبدار کردن گرما بیرون داده می‌شود. ازبین‌بردن گرمای حاصل در سازه‌های پرحجم مانند سدها محتاج شرایط ویژه‌ای است.

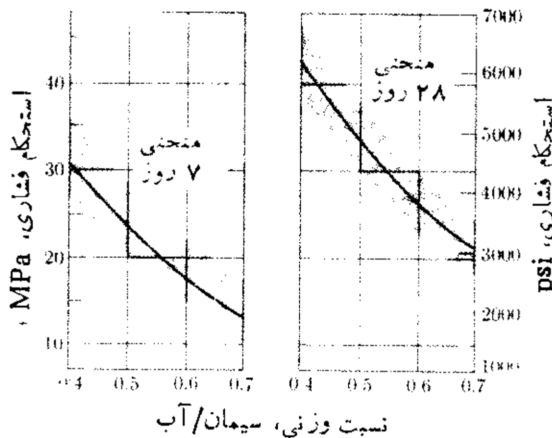
متغیرهایی که شرح داده‌ایم نشان می‌دهند که می‌توان انواع متنوع سیمان را برای به‌دست آوردن مشخصات مختلف به‌کار برد. مثلا سیمانی کـه مقدار تری‌کلسیم سیلیکات ($Ca_3SiO_5$) آن بیشتر باشد به‌سرعت‌خود را می‌گیرد و زود استحکام به‌دست می‌آورد.* برعکس در شرایطی که گرمای واکنش ممکن است مشکلاتی به‌وجود آورد و مدت زمـان بیشتری برای خودگیری دراختیار است، سیمان غنی‌از $Ca_2SiO_4$ به‌کار می‌رود. انجمن امریکایی آزمایش و مـواد (ASTM) انواع سیمانهـای زیر را در فهرستی ذکر کرده است: (۱) نوع I، در ساختمانهای بتنی معمولی به‌کار می‌رودکه در آنها خواص ویژه‌ای موردنیاز نیست. (۲) نوع III، وقتی به‌کار می‌رودکـه استحکام سریع بتن مطلوب باشد. (۳) نوع IV، وقتی استفاده می‌شود که گرمای آبدار کردن اندکی لازم باشد. دونوع دیگر نیز وجود دارد (II و V) این دو درموارد بخصوصی به‌کار می‌روند که خورندگی سولفات درطراحی موردنظر باشد.

**مخلوطهای بتن.** نسبت مخلوطهای بتن معمولا براساس مقدار سیمان به‌کـار رفته تعیین می‌شود. بنابراین می‌توان مخلوط ۱ر۳ سنگریزه-۶ر۲ ماسه -۱ سیمان- ۵۵ر۰ آب را براساس وزن تعیین کرد (یا این مقادیر را به‌حجمهای مربوط به‌آنها تبدیل کرد).

ابتدا خواهیم دید که نسبت سیمان به‌آب بـرای استحکام بتن بحرانی است (شکل ۱۳-۲-۶). از آنجاکه آب اضافی‌وارد واکنش‌آبدار کردن نمی‌شود، فضایی را اشغال خواهدکرد واز پیوند جامدبه‌جامد جلوگیری خواهدکرد. اگر آب اضافی سرانجام تبخیر

---

* با آسیاب کردن سیمان و تبدیل آن به‌ذرات ریز نیز می‌توان سیمانی به‌دست‌آورد که خیلی زود محکم می‌شود.




**شکل ۱۳-۲-۶** استحکام بتن برحسب نسبت آب به‌سیمان [سیمان پرتلند نوع I، عمل‌آمده‌در رطوبت در ۲۰°C (۶۸°F)]. برای تأمین کارپذیری مخلوط و کسب اطمینان از اینکه اشکال پرشده‌اند، بی‌آنکه حفره‌ای وجود داشته باشد، باید آب کافی موجود باشد. واضح است که آب زیادی به‌فضای اضافی نیاز دارد یعنی در این‌حالت چسبندگی کمتر است.

شود، ترکهای‌مویی باقی خواهندماند. بنا براین مخلوط باکمترین‌نسبت‌ممکن سیمان به‌آب ساخته می‌شود، ولی حدی وجود دارد. باید آب کافی موجود باشد تابتن را کارپذیر کند و بتن بتواند بدون حفره، قالب را کاملا پر کند. روشهای ارتعاشی به‌پرکردن قالب کمك می‌کنند، همچنین فرستادن حبابهای‌هوا (به‌قطر تقریباً ۱ میلی‌متر) به‌داخل بتن بااستفاده از عاملهای هواده کارپذیری آن را افزایش می‌دهد (و بنابراین مقدار آب‌لازم را کمتر می‌کند) این حفره‌های کروی به‌اندازهٔ ترکهای مویی که پس‌از تبخیر آب‌اضافی به‌وجود می‌آیند، بتن را ضعیف نمی‌کنند.*

حبابهای هوا که عاملهای هوادهنده وارد بتن می‌کنند نیز مقاومت بتن را در برابر فساد حاصل از انجماد و میعان آب در داخل منفذها افزایش می‌دهند. در نتیجه ویژگی تقریباً تمام به‌تنهایی که در سنگ‌فرش جاده‌های نواحی سردسیر، به‌کار می‌روند، این است که عاملهای‌هواده دارند.

حجم مخلوط بتن را از حجم کلوخه‌ها، سیمان و آب افزوده شده می‌توان محاسبه کرد. مطابق مثال ۱۳-۲-۳، فرض می‌کنیم که ماسه فضای بین سنگریزه‌ها را (بیش‌از اندازه) پرخواهد کرد وقسمتهای سیمان و آب فواصل بین‌ماسه را بیش‌از اندازه پرخواهند کرد. بالاخره می‌توان حجم هوایی که عاملهای هواده وارد بتن می‌کنند را تنظیم کرد.

---

* به‌اثر دانه‌های کروی گرافیت وپوسته‌های گرافیتی دراستحکام چدن (بخش ۱۳-۱) رجوع کنید.

چگالی و تخلخل محصول بتنی ممکن است بـه‌حجمهای مختلف آن محصول یعنی حجمهای حقیقی، ظاهری وکل (روابط ۱۳-۲-۱ تا ۱۳-۲-۵) بستگی داشته باشد. در بین خصوصیات بتن به‌ترتیب چگالی و تخلخل‌اهمیت بیشتری دارند. مثلا گرمای تلف‌شده از میان دیوار تابعی ازحجم حقیقی (و کل تخلخل) است، در حالی‌که نفوذپذیری دیوار نسبت به‌آب به‌مقدار تخلخل ظاهری (باز) بستگی دارد.

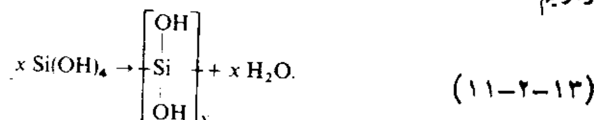
**سیمانهای دیگر.** سیمان پرتلند درظرفیتهای بالا تولید می‌شود. البته سیمانهـای دیگری نیز وجـود دارند. سنگ‌گچ و آهك نیز سیمانهای هیدرولیکی‌اند. مثلا سنگ‌گچ (گچ پاریس) به‌صورت زیر عمل می‌کند



$$2(CaSO_4 \cdot H_2O + 3H_2O \rightarrow 2(CaSO_4 \cdot 2H_2O) \qquad (۱۰-۲-۱۳)$$

اصولا مـکانیسم سخت‌کـردن‌آن شبیه به‌سیمان پرتلند است. زیـرا ترکیب اولیه به‌شکل آبدار شده حل می‌شود و مجدداً رسوب می‌کند.

سیمانهای پلی‌مری، واکنش پلی‌مرکردن را شامل می‌شوند؛ درمورد اسید سیلیسیك داریم

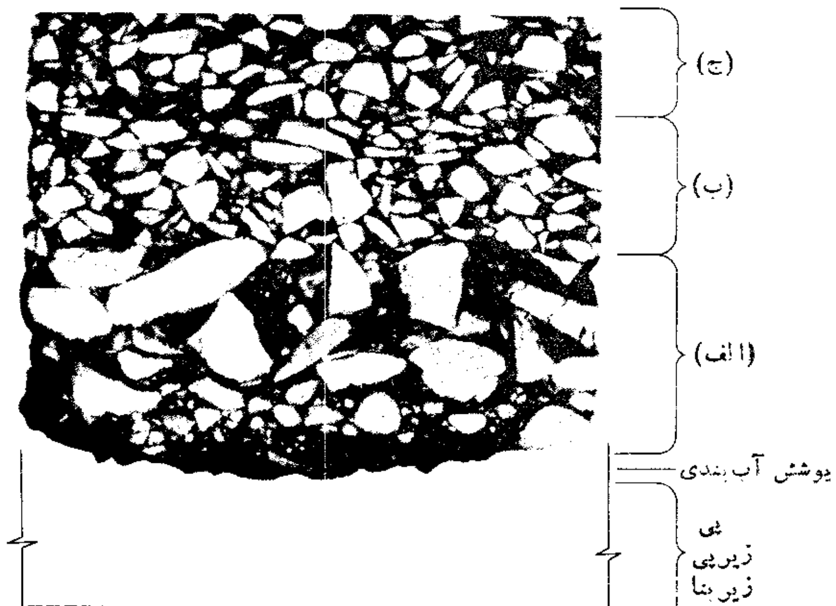


$$x\,Si(OH)_4 \rightarrow \left[\begin{matrix} OH \\ | \\ Si \\ | \\ OH \end{matrix}\right]_x + x\,H_2O. \qquad (۱۱-۲-۱۳)$$

در این مثال واکنش پلی‌مـر کردن واکنش تراکمی است. واکنش فوق وقتی کـه آنقدر گسترده می‌شود تـا دو رادیکال OH باقیمانده را نیز دربر بگیرد یـك ساختار بی‌شکل سه‌بعدی $SiO_2$ را ایجاد می‌کند. واکنشهای پیچیده‌تر دیگری در سیمانهای اپوکسی رخ می‌دهد. بعضی از آنها پیوندهای فوق‌العاده قوی به‌وجود می‌آورند.

پیوند توسط مواد گرما نرم نیز به‌دست می‌آید. آسفالت جزء این دسته است و در کمیتهای کیلوتنی برای بزرگراهها استفاده می‌شود. آسفالت اصولا برای تأمین چسبندگی کلوخه‌ها و به‌دست آوردن فشردگی مؤثرتر در بسترجاده‌ها، گرم می‌شود. پس‌از سردشدن تا زیر دمـای انتقال، سخت می‌شود. طبق شکل ۱۳-۲-۷ مهندسان ساختمـان ترکیب و ساختار محصول‌نهایی را معین می‌کنند تابتوانند نیازهای مختلف بستر جاده‌ها را برآورده سازند. برای‌کسب اطلاعات بیشتر می‌توان به‌کتابهای مواد ساختمانی بزرگراهها مراجعه کرد.

**مثال ۱۳-۲-۱** نمونه‌ای از ماسهٔ تر را خشك می‌کنیم تا آب سطحی آن و نه‌آب جذب شده‌اش، خشك‌شود. وزن آن ۸٫۹۱ کیلوگرم است. در این صورت حجم انباشتی ذرات سنگریزه (بدون منفذهایی بین آن) بـا جانشین‌سازی آب ۳۵۷۰ $cm^3$ تعیین شده است. پس‌از خشك‌کردن کامل وزن آن ۸٫۷۹ کیلوگرم است.




**شکل ۱۴-۲-۷** مغزه‌های سنگ‌فرش آسفالت ($\times$ ۵ر۰). این محصول مانند بتن انباشته شده است؛ ولی آسفالت ویسکوز درست مانند سیلیکات آبدار به‌عنوان پیوند عمل می‌کند. الف) مرحلهٔ پیوند. ماسه (۳۰ w/o) و آسفالت (۵ w/o)، فواصل بین سنگهای درشت (۶۵ w/o) را پر می‌کنند، تا تکیه‌گاه صلبی روی کلوخه‌هایی که در زیر قرار داده شده‌اند به‌وجود آید؛ ب) مرحلهٔ تراز کردن. ترکیب آن شبیه به مرحلهٔ قبل است بجز آنکه سنگها ریزترند؛ ج) مرحلهٔ سایشی. با آسفالت بیشتر (۶ w/o)، ماسهٔ بیشتر (۵۵ w/o) و ۵-۴ w/o کانی پرکننده (خاکستر بسادی) سطح نفوذناپذیر چقرمه‌ای تشکیل می‌شود که در مقابل سایش حاصل از رفت‌وآمد مقاوم است.

الف) تخلخل ظاهری آن چقدر است؟

ب) چگالی ظاهری ذرات سنگریزه چقدر است؟

حل: حجم انباشتی $=$ ۳۵۷۰ $cm^3$ (یا ۰۰۰۳۵۷ر۰ $m^3$). از آنجا که در منفذهای باز ۰۱۲ر۰ کیلوگرم (۱۲۰ $cm^3$) آب جذب می‌کند، حجم ظاهری آن برابر است با
۳۵۷۰ $-$ ۱۲۰ $cm^3$ $=$ ۳۴۵۰ $cm^3$ (یا ۰۰۰۳۴۵ر۰ $m^3$)

$$\text{تخلخل ظاهری سنگریزه} = \frac{۱۲۰\ cm^3}{۳۵۷۰\ cm^3} \qquad \text{(الف)}$$

$$= \%۳ر۴$$

ب) $\text{چگالی ظاهری سنگریزه} = \dfrac{۸۷۹۰\ \text{g}}{۳۴۵۰\ \text{cm}^۳}$

$= ۲٫۵۵\ \text{g/cm}^۳\ (\text{یا}\ ۲٫۵۵\ \text{Mg/m}^۳)$

توضیح. چگالی انباشتی ذرات سنگریزه را نیز می‌توان محاسبه کرد.

$$\frac{۸۷۹۰\ \text{g}}{۳۵۷۰\ \text{cm}^۳} = ۲٫۴۶\ \text{g/cm}^۳\ (\text{یا}\ ۲٫۴۶\ \text{Mg/m}^۳)$$ ▲

**مثال ۱۳-۲-۲** چگالی حقیقی بتن که به‌آن عامل هواده افزوده شده است برابر $۲٫۸۰\ \text{Mg/m}^۳$ است. ولی مغزهٔ خشکی ($۱۰۲\ \text{mm} \times ۱۵۲\ \text{mm}$ قطر) از این بتن فقط $۲٫۹۸۲\ \text{kg}$ وزن دارد. همین مغزه وقتی ازآب اشباع شود $۳٫۰۸\ \text{kg}$ وزن دارد.

الف) درصد منفذهای باز و بسته در بتن حاصل چقدر است؟

ب) چگالی انباشتی وظاهری بتن حاصل چقدر است؟

حل:

$$\text{حجم انباشتی} = \pi\,(۵۱\ \text{mm})^۲\,(۱۵۲\ \text{mm})\left(\frac{۱\ \text{cm}^۳}{۱۰۰۰\ \text{mm}^۳}\right)$$

$$= ۱۲۴۲\ \text{cm}^۳$$

$$\text{حجم حقیقی} = \left[\frac{۲۹۸۲\text{g}}{۲٫۸ \times ۱۰^۶\text{g/m}^۳}\right](۱۰^۶\text{cm}^۳/\text{m}^۳)$$

$$= ۱۰۶۵\ \text{cm}^۳$$

$$\text{تخلخل کل} = \frac{۱۲۴۲\ \text{cm}^۳ - ۱۰۶۵\ \text{cm}^۳}{۱۲۴۲\ \text{cm}^۳} = ۱۴\ \text{v/o}$$

$$\text{حجم منفذهای باز} = \frac{۳۰۸۰\text{g} - ۲۹۸۲\ \text{g}}{۱\text{g}H_۲O/\text{cm}^۳}$$

$$= ۹۸\text{cm}^۳\ H_۲O$$

الف) $\text{تخلخل ظاهری (باز)} = \dfrac{۹۸\ \text{cm}^۳}{۱۲۴۲\text{cm}^۳} = ۰٫۰۸\ \ (\text{یا}\ ۸\ \text{v/o})$

منفذهای بسته $۱۴\ v/o - ۸\ v/o = ۶\ v/o$

ب)
$$\text{چگالی انباشتی} = \frac{۲۹۸۲\ g}{۱۲۴۲\ cm^۳} = ۲٫۴\ g/cm^۳$$

$$= ۲٫۴\ Mg/m^۳$$

$$\text{چگالی ظاهری} = \frac{۲۹۸۲\ g}{۱۲۴۲ - ۹۸\ cm^۳} = ۲٫۶ g/cm^۳$$

$$= ۲٫۶\ Mg/m^۳$$ ▲

**مثال ۱۳-۲-۳** مخلوط واحد بتن شامل $۱۳۶\ kg$ سنگریزه، $۹۵\ kg$ ماسه، $۴۲٫۷\ kg$ سیمان پرتلند، و $۲۲٫۵\ kg$ آب، به‌علاوه $۵\ v/o$ هوای عبوری است. برای ساختن دیوار حائل $۲۸٫۶\ m \times ۱٫۰۷\ m \times ۰٫۳۰۵\ m$ چقدر سیمان لازم است؟

| ماده | چگالی $Mg/m^۳$* ظاهری | انباشتی* |
|---|---|---|
| سنگریزه | ۲٫۶۰ | ۱٫۷۶ |
| ماسه | ۲٫۶۵ | ۱٫۶۸ |
| سیمان | ۳٫۲۵ | ۱٫۵۰ |

* برمبنای دریافت شده (شامل حجم فضاهای بین ذرات است).

حل: یک واحد مخلوط: مبنا

$$\text{حجم سنگریزه} = \frac{۱۳۶٫۰۰۰\ g}{۲٫۶۰ \times ۱۰^۶\ g/m^۳} = ۰٫۰۵۲۳\ m^۳$$

$$\text{حجم ماسه} = \frac{۹۵۰۰۰\ g}{۲٫۶۵ \times ۱۰^۶\ g/m^۳} = ۰٫۰۳۵۸$$

(درفضای بین سنگریزه‌ها)

$$\text{حجم سیمان} = \frac{۴۲۷۰۰\,g}{۳٫۲۵ \times ۱۰^{۶}\,g/m^{۳}} = ۰٫۰۱۳۱$$

(درفضای بین ماسه و سنگریزه)

$$\text{حجم آب} = \frac{۲۲۵۰۰\,g}{۱۰^{۶}\,g/m^{۳}} = ۰٫۰۲۲۵$$

(در فضای باقیمانده بین اجسام جامد)

$$\text{مجموع حجم سنگریزه، ماسه، سیمان و آب} = ۰٫۱۲۴\,m^{۳}$$

$$\frac{m^{۳}\ \text{کل}}{\text{مخلوط واحد}} = \frac{۰٫۱۲۴\,m^{۳}}{۰٫۹۵} = ۰٫۱۳۰۵\,m^{۳}$$

$$\text{مخلوطهای واحد} = \frac{۹٫۳۳\,m^{۳}}{۰٫۱۳۰۵\,m^{۳}} = ۷۱٫۵$$

$$\text{سیمان لازم} = (۷۱٫۵)(۴۲٫۷\,kg) = ۳۰۵۰\,kg$$

**مثال ۱۳-۲-۴** مخلوط بتن شامل ۵۸۵ kg ماسه وسنگریزه، ۱۰۰ kg سیمان، و ۵۵kg آب است. فرض کنید سیمان الف) تماماً تری‌کلسیم آلومینات، $Ca_3Al_2O_6$ است؛ ب) تماماً تری‌کلسیم‌سیلیکات $Ca_3SiO_5$ است؛ ج) تماماً دی‌کلسیم سیلیکات $Ca_2SiO_4$ است. افزایش دما درحین آبدار کردن چقدر است؟ گرمای ویژهٔ متوسط مخلوط بتن ۰٫۸J/g·°C (یا ۰٫۲ cal/g·°C) است. فرض‌کنید نیمی از گرما تلف شود.

حل:

ازداده‌های شکل ۱۳-۲-۵، مبنا: ۱ g سیمان = ۷٫۴ g مخلوط

الف) $(۰٫۵)(\text{سیمان}\ ۸۶۵\ J/g) = (۰٫۸\ J/g\cdot°C)\Delta T\ (\text{سیمان}\ ۷٫۴\ g/g)$;

$$\Delta T = ۷۳°C$$

ب)
$$\Delta T = \frac{۰٫۵\ (۵۰۰\ J)}{۵٫۹۲\ J/°C} = ۴۲\ °C$$

ج)
$$\Delta T = \frac{۰٫۵\ (۲۶۰\ J)}{۵٫۹۲\ J/°C} = ۲۲°C$$

توضیح. $Ca_3Al_2O_6$ و $Ca_3SiO_5$ نه‌تنها بیشتراز $Ca_2SiO_4$ گرما آزاد می‌کنند بلکه درمدت نسبتاً کوتاهی واکنش انجام می‌دهند. بنابراین در مراحل اولیهٔ

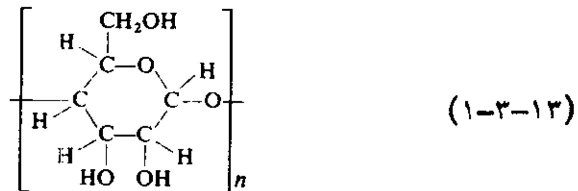
خودگیری از ساختمانهای بزرگ کسر کوچکتری از گرما خارج می‌شود. افزایش دما ممکن است بحرانی شود مگر اینکه فقط مقدارکمی $Ca_4Al_2O_7$ و $Ca_3SiO_5$ در سیمان موجود باشد.
▲

## □ ۱۳-۳ چوب

اگرچه ساختار چوب پیچیده است ولی ماده‌ای به‌حد کافی آشناست به‌طوری‌که خواص و ساختار آن را می‌توان کاملا تشخیص داد. ماکروساختار آن در دانه‌هایش آشکار است. میکروساختار آن منشأ بیولوژیکی دارد؛ وکوئوردیناسیونهای اتمی آن مولکولی‌اند.

البته چوب مادهٔ مهندسی بسیار مهمی است. نسبت استحکام به‌وزن آن زیاد است. به‌آسانی حتی درهنگام کار شکل می‌گیرد. و بالاخره در این‌روزهای کمبود مواد خام می‌تواند جانشین مواد دیگر شود. ازخواص جهتدارش آگاهی داریم، همیشه در هنگام استفاده از آن باید این خواص را در نظر گرفت. برای درك بیشتر چوب، ساختارش را بررسی می‌کنیم.

چوب مادهٔ چندسازهٔ پلی‌مری طبیعی‌است. مولکولهای پلی‌مری اصلی‌آن سلولزی‌اند.



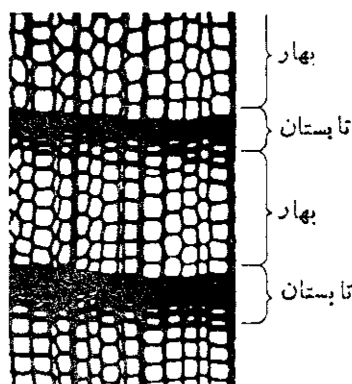
(۱۳-۳-۱)

از آنجاکه سلولز تك‌آرایشی است و شاخه‌های جانبی ندارد، اندکی بلورین می‌شود. علاوه برترکیب ۵۰٪ سلولزی‌آن، چوب ۱۰٪ تا ۳۵٪ لیگنین دارد که پلی‌مری سه‌بعدی با اتصال متقاطع و پیچیده‌تر است.

از مولکولهای‌پلی‌مری‌بزرگتر، متداولترین ساختار چوب، سلولهای بیولوژیکی‌اند که در بین‌آنها آوندهای ناقص از همه شناخته شده‌ترند. اینها سلولهای دوکی شکل سوراخداری‌اند که درجهت طولی چوب امتداد دارند. آشکارترین واحد ساختاری آن دانهٔ چوب است‌که از لایه‌های بهاری و تابستانی ساخته شده‌است. سلولهای بیولوژیکی چوب بهاری بزرگتر است و نسبت به‌چوب تابستانی دیواره‌های نازکتری دارد (شکل ۱۳-۳-۱). ازاین‌حیث سلولهای بیولوژیکی‌نسبت به‌سلولهای‌واحد بلورها ازنظرساختار بسیار متنوعترند.

البته، توضیح فوق درمورد چوب بسیار ساده شده است* ولی علت چندسویی در

* انواع مختلف ترکیبات شیمیایی جزئی چوب و شعاعهای آوندی که ردیفهایی از تك‌سلولهای هم‌جهت‌اند و از مرکز درخت درجهت شعاع منشعب می‌شوند، به‌حساب نیامده‌اند. این عوامل در حین تغییرشکل اهمیت پیدا می‌کنند.




**شکل ۱۳-۳-۱** میکروساختار چوب. واحدهای ساختاری، سلولهای بیولوژیکی‌اند. سلولهایی که با رشد زود (بهاری) تشکیل می‌شوند. از آنهایی که با رشد دیر (تابستانی) تشکیل می‌شوند بزرگترند ولی دیواره‌های نازکتری‌دارند. سلولز (فرمول ۱۳-۳-۱) جزء مولکولی اصلی آن است.

خواص را که از ویژگیهای مهم چوب است، نشان می‌دهد.

در موادی که ساختار ساده دارند چگالی، خاصیتی مستقل از ساختار است. این امر درمورد مادهٔ پیچیده‌ای مثل چوب صادق نیست. در درجهٔ اول مقدار چوب بهاری و تابستانی از نوعی به‌نوع دیگر تفاوت دارد. در درجهٔ دوم نسبت سلولز به‌لیگنین تغییر می‌کند (به‌ترتیب $\rho = \sim ۱٫۵۵\ g/cm^۳$ و $\sim ۱٫۳۵\ g/cm^۳$) در نتیجهٔ این دوعامل، چگالی می‌تواند گستره‌ای از تقریباً $۰٫۱۵ g/cm^۳$ برای بالزا تا $۱٫۳\ g/cm^۳$ برای لیگنم‌ویتای* پرچگالی، داشته باشد. علاوه‌بر عوامل فوق‌چوب نمگیر است، زیرا رطوبت را به‌صورت تابعی از رطوبت هوای محیط اطراف جذب می‌کند. به‌همین علت بیشتر چوبها هنگامی که خیس‌اند، افزایش ویژه‌ای در چگالی نشان می‌دهند.

**چند سویی.** تعجبی ندارد اگر بگوییم تغییرات ابعادی حاصل از تغییر در دما، رطوبت، و بارگذاری مکانیکی در چوب، چندسو است. متخصصین چوب متذکر می‌شوند که انبساط گرمایی در جهت مماسی، $t$، (شکل ۱۳-۳-۲) و شعاعی، $r$، بیشتر از جهت طولی، $l$، است. انبساط گرمایی درجهت‌طولی تقریباً مستقل از چگالی است، درحالی که در دوجهت دیگر به‌چگالی $\rho$ (برحسب $g/cm^۳$) بستگی دارد. بین $-۵۰°$ و $+۵۵\ °C$

$$\alpha_t \simeq [۶\rho + ۳] \times ۱۰^{-۵}/°C$$

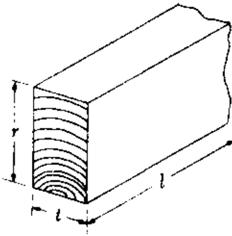
$$\alpha_r \simeq [۶\rho + ۲] \times ۱۰^{-۵}/°C$$

$$\alpha_l \simeq ۰٫۴ \times ۱۰^{-۵}/°C$$

پس روابط فوق‌حاکی از آن است که انبساط گرمایی عرضی بیش‌از ده برابر انبساط‌طولی است.

---

* نوعی درخت گرمسیری صمغ دار در امریکا که چوب‌سختی دارد.ـم.




**شکل ۱۳-۳-۲** ماکروساختار چوب. خواص آن چند سو است زیرا رشد آن لایه‌هایی از سلول با خواص مختلف به‌وجود می‌آورد. استحکام، مدول کشسانی و ضرایب انبساط همه در جهتهای مختلف، متفاوت‌اند.

مثلاً، مقادیر طولی مدول یانگ اگر در کشش اندازه‌گیری شود بین ۷۰۰۰ MPa تا ۱۴۰۰۰ MPa است. مقادیر مماسی معمولاً بین ۴۰۰ MPa و ۷۰۰ MPa است. در حالی که مقادیرشعاعی معمولاً در گسترهٔ ۵۰۰MPa تا ۱۰۰۰ MPa قرار دارد. انتظار می‌رود مقدارطولی بیشترین مقدار باشد. هرچند می‌توان پیش‌بینی کرد که‌مدولهای مماسی نیز از شعاعی بیشترند. ولی‌درشکل ۱۳-۳-۱ شعاعهای آوندی را که در پانوشت مربوط به‌آن شرح دادیم به‌حساب نیاورده‌ایم. این پدیده موجب به‌وجود آمدن صلابت اضافی در جهت شعاعی می‌شود.

انقباض نیز چند سواست. تغییرات طولی قابل اغماض‌اند، ولی انقباض مماسی بسیار بالاست (۲۵ l/o درصد در هر ۱ w/o رطوبت برای درخت صنوبر داگلاس)* انقباض شعاعی درحد متوسط است (در هر ۱ w/o، تقریباً** ۱۵ l/o درصد رطوبت برای همین چوب). علت این امر آثار کرنشی مجدد شعاعهای آوندی است. آثار انقباض در شکل ۱۳-۳-۳ خلاصه شده است. نتایج اعوجاج یا تاب‌برداشتن کاملا آشکار است.

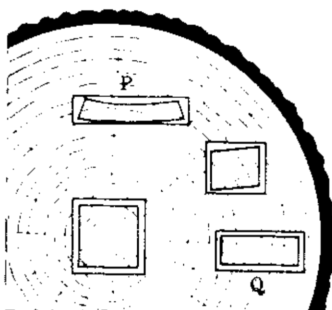
استحکام کششی طولی $S_l$ بیش‌از بیست برابر استحکام کششی شعاعی $S_r$ است. زیرا هر شکستی که رخ‌می‌دهد باید درعرض سلولهای آوند ناقص صورت گیرد. افزایش‌چگالی (برای رطوبت معین)، افزایش ضخامت دیواره‌های سلولها و بنابراین افزایش نسبی در استحکام‌طولی را منعکس‌می‌کند. ستحکام عرضی نیز مطابق آن زیاد می‌شود (بازهم برای رطوبت معین)، زیرا هرچه چگالی چوب بیشتر باشد، فرصت‌کمتری برای شکست در جهت موازی با سلولهای خالی آوند ناقص دارد.

بجز درمواردی که درطراحی استحکام طولی‌مدنظر است، چندسویی چوب‌نامطلوب است. بنابراین‌برای‌بهبود ساختار آن کارهای‌بسیاری انجام شده‌است مثلا (۱) تختهٔ چندلا که درآن از استحکام طولی در دوجهت استفاده شده است؛ (۲) فیبر که درآن بافتهای منفرد چوب جدا شده‌اند و به‌صورت تصادفی درصفحهٔ مسطحی در کنار هم قرار گرفته‌اند؛ (۳) نئوپان که درآن پوسته‌های نازک یا ذرات چوب به‌صورت تصادفی روی صفحه‌ای

---

* نوعی درخت بلند همیشه‌سبز از خانوادهٔ کاجها که در نواحی غربی امریکای‌شمالی یافت می‌شود.—م.

** براساس ابعاد چوب‌تر تعیین شده است.




**شکل ۱۳-۳-۳** انقباض چوب. از آنجا که ساختار چندسو است، انقباض با جهتگیری تغییر می‌کند. اگر چوب قبل از آنکه کاملا خشک شود بریده‌شود، ممکن است تاب بردارد. (انقباض در این شکل اغراق‌آمیز است.) Q = به‌صورتی که طول درجهت شعاعی باشد اره شده است؛ P = به‌صورتی که ضخامت در جهت شعاعی باشد اره شده است.

کنار هم قرار می‌گیرند و با چسب به‌یکدیگر چسبانده می‌شوند؛ و (۴) کاغذ که در آن رشته‌های از هم جدا شدهٔ چوب (چوب خمیری) به‌صورت تصادفی روی ورقی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و با پیوندهای هیدروژنی به‌یکدیگر متصل می‌شوند؛ (۵) بالاخره از چوب (و از رشته‌های پنبه) می‌توان سلولز استخراج کرد و از آن به‌عنوان مادهٔ خام بعضی از محصولات پلی‌مری مثل سلولز استات (ابریشم مصنوعی و غیره) استفاده کرد.

**مثال ۱۳-۳-۱** درچوبی صلبی ازچسباندن لبه‌های تخته‌هایی که طول آنها درجهت شعاعی است و از چوب صنوبر داگلاس ساخته شده است. یعنی عرض تخته درجهت شعاعی و ضخامت آن درجهت مماسی (و البته طول آن درجهت طولی چوب) است، ابتدا در اواخر پاییز وقتی که رطوبت چوب ۹ درصد بوده است در ابعاد ۷۶۱ mm در ۲۰۳۵ mm بریده شده است (تا برای ورودی ۷۶۵ × ۲۰۵۰ mm مناسب باشد). آیا وقتی که میزان رطوبت به ۱۴ درصد برسد درخواهد «چسبید»؟

حل:

$$\text{تغییر شعاعی} = 0.0015/\% \times (14\% - 9\%) = +0.0075$$

$$\Delta L = (761\ \text{mm})(+0.0075) = +5.7\,\text{mm}$$

مناسب نخواهد بود، زیرا ۷۶۱ + ۵٫۷ mm از ۷۶۵mm بیشتر است. تغییر طول قابل اغماض است.

توضیح. طرحی پیشنهاد کنید که این مشکل را کمینه کند. ▲

**مثال ۱۳-۳-۲** تخته‌ای ازچوب صنوبر داگلاس داریم که پهنای آن درجهت مماسی است. و زمانی که رطوبت از ۵ به ۱۰ درصد افزایش می‌یابد، پهنای این تخته نباید افزایش یابد. چه فشاری به‌موازات دانه‌ها به‌وجود می‌آید؟

حل: اگر انبساط مجاز بود

$$\frac{\Delta L}{L}=0.00025/\%\times(\%10-\%5)=+0.0125$$

فرض می‌کنیم $E=550$ MPa یعنی متوسط مقدار آنچه‌که در متن برای مدول مماسی ذکر شده است. پس فشار (−) چوب را به‌ابعاد اولیه آن برمی‌گرداند.

$$s=(-0.0125)(550\,\text{MPa})$$

$$=7\,\text{MPa}\ \text{فشاری}$$ ▲

**مثال ۱۳-۳-۳** جذب آب از رطوبت‌هوا به‌داخل چوب ابتدا در میان رشته‌های چوب انجام می‌شود (ونه در داخل منفذها). نقطهٔ اشباع رشته‌ها برای بیشتر چوبها ۳۰ w/o~ (از چوب‌خشک شده در کوره) است. افزایش چگالی درخت‌غوشه یا غان (باچگالی چوب خشک‌شده درکوره = $0.56\,\text{g/cm}^3$~) وقتی که رطوبت‌از ۱۰٪ تا ۲۰٪ تغییر می‌کند چقدر است؟ (فرض‌کنید انقباض آن برابر انقباض چوب‌صنوبر داگلاس باشد.)

حل: چوب خشک $1\,\text{cm}^3$: مبنا

| با ۱۰٪ رطوبت | با ۲۰٪ رطوبت |
|---|---|
| $l=1.000\,\text{cm}$ | $l=1.000\,\text{cm}$ |
| $r=1.000[1+(0.0015/\%)(\%10)]$ $=1.015\,\text{cm}$ | $r=1.030\,\text{cm}$ |
| $t=1.000[1+(0.0025/\%)(\%10)]$ $=1.025\,\text{cm}$ | $t=1.050\,\text{cm}$ |
| حجم $=1.04\,\text{cm}^3$ | $V=1.08\,\text{cm}^3$ |
| چگالی $=\dfrac{(0.56\,\text{g})(1.10)}{1.04\,\text{cm}^3}=0.59\,\text{g/cm}^3$ | $\rho=\dfrac{(0.56\,\text{g})(1.20)}{1.08\,\text{cm}^3}=0.62\,\text{g/cm}^3$ |

$$\Delta\rho=\frac{0.62\,\text{g/cm}^3-0.59\,\text{g/cm}^3}{0.59\,\text{g/cm}^3}=\%5\ \text{افزایش}$$ ▲

## ۱۳-۴ مواد چندسازه

قبلا بعضی ازمواد چندسازه را (آنهایی‌راکه درمقیاس‌میکروسکوپی تقویت شده‌اند) شرح دادیم. بینیت، مارتنزیت بازپخت‌شده، و آلیاژهای رسوب‌سختی (پیرسختی) شده باتوزیع ذرات ریزفاز سخت‌تر استحکام‌می‌یابند. مثلا استحکام کششی ($\alpha+\overline{C}$) درمارتنزیت بازپخت شده می‌تواند بیش‌از ۱۴۰۰ MPa باشد. درحالی‌که استحکام کششی فریت، $\alpha$، به‌تنهایی کمتراز ۲۰٪ این‌مقدار است. افزایش استحکام به‌این علت‌است کــه فاز تغییرشکل‌پذیر نمی‌تواند مستقل از فاز صلب کرنش بپذیرد.

مواد چندسازهٔ تقویت‌شده درمقیاس ماکروسکوپی را به‌خوبی می‌شناسیم. نمونه‌هایی ازآن شامل بتن مسلح و پلاستیکهای تقویت‌شده با رشته‌ها (FRP) است. چوب ماهیگیری «شیشه‌ای» را درنظر بگیرید. این وسیله از یك‌دسته رشته‌های شیشه‌ای موازی کــه توسط رزین پلی‌مری به‌هم چسبانده شده‌اند تشکیل شده است (یا برعکس میله‌ای پلاستیکی است که درجهت طولی توسط رشته‌هـای شیشه‌ای تقویت شده است). اگر این مـادهٔ چندسازه تحت‌کشش قرارگیرد، پلاستیك و شیشه باید به‌طـور هماهنگ تغییرشکل دهند، بـاوجود اینکه هردوجزء ممکن‌است مدول کشسانی کاملا متفاوتی داشته باشند ($E_{\text{شیشه}}/E_{\text{پلاستیك}}>۱۰$) یا استحکام یکایك آنها به‌طور محسوسی تفاوت داشته باشد ($S_{\text{شیشه}}/S_{\text{پلاستیك}}>۲۰$).

دراینجا پلاستیك تقویت‌شده با رشته‌ها را، کــه در بالا ذکر شد، وقتی تحت‌کشش قرار داردتحلیل می‌کنیم. اگر رشته‌ها پیوسته‌باشند $e_{\text{شیشه}}=e_{\text{پلاستیك}}$، زیراهردو به‌یکدیگر چسبانده شده‌اند. به‌همین‌ترتیب درمی‌یابیم که $s_{\text{شیشه}}\neq s_{\text{پلاستیك}}$ زیرا این‌دو مدول کشسانی، $E$، متفاوتی دارند

$$\frac{s_1}{E_1}=e_1=e_2=\frac{s_2}{E_2} \qquad (۱۳-۴-۱)$$

دراینجا زیرنویسها دوجزء را نشان می‌دهند. بنابراین

$$\frac{s_1}{s_1}=\frac{E_1}{E_2} \qquad (۱۳-۴-۲)$$

قبلا در مبحث چندسویی کشسان (شکل ۶-۳-۴) به این‌مطلب برخورد کرده‌ایم. این امر ما را به‌قاعدهٔ اول‌تقویت هدایت می‌کند. فاز تقویت‌کننده باید فازی باشد که‌مدول بیشتری دارد تا بتواند بار اضافه را تحمل‌کند.

می‌توانیم قواعد اختلاط را نه‌تنها برای چگالی (رابطهٔ ۱۰-۲-۱)، گرمـای ویژه (رابطهٔ ۱۰-۴-۲)، و رسانندگی (معادله‌های ۱۰-۴-۳ و ۱۰-۴-۴) بلکه‌برای چندین خاصیت مکانیکی مثل مدول یـانگ نیز بنویسیم. بـار دیگر نظر شما را بــه پلاستیکهای تقویت‌شده با رشته‌ها که درپاراگراف قبل‌آمده جلب می‌کنیم. اگر $f_1$ و $f_2$ نسبت حجم دوجزء را نشان‌دهند، و رابطهٔ ۱۳-۴-۱ را به‌کار بریم، ازآنجاکه $e_1=e_2$، پس

$$\frac{F_1/f_1A}{E_1}=\frac{F/A}{\bar{E}}=\frac{F_2/f_2A}{E_2} \qquad *(۳-۴-۱۳)$$

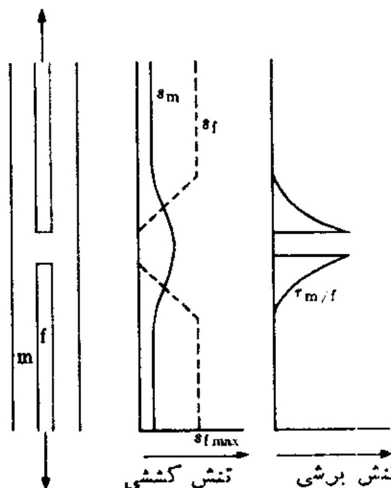
دراینجا $\bar{E}$ مدول مادهٔ چندسازه است. همچنین، ازآنجاکه بارکل $F$ مساوی مجموع بارهاست، $F=F_1+F_2$

$$F=\frac{f_1E_1F}{\bar{E}}+\frac{f_2E_2F}{\bar{E}}$$

$$\bar{E}=f_1E_1+f_2E_2 \qquad *(۴-۴-۱۳)$$

□ **تنشهای بین سطحی.** هرمهندس عمران می‌داندکه تنشهای برشی درسطح بین میلهٔ تقویت‌کننده و بتن ظاهر می‌شوند. به‌همین دلیل میله‌های «تغییرشکل یافته»ای با سطح کنگره‌ای (ASTM , A ۳۰۵) به‌کار می‌برند. تنشهای برشی مشابه‌آن در بین رشته‌های تقویت‌کننده و زمینهٔ پلاستیکی اطراف آن دیده می‌شوند. ولی دراینجا به‌جای پیوندهای مکانیکی، پیوندهای شیمیایی تنشهای برشی را تحمل می‌کنند.

اگر تقویت‌کننده یکپارچه نباشد تنشهای برشی بین سطحی اهمیت خاصی می‌یابند. این مطلب را شکل ۱۳-۴-۱ نشان می‌دهد. در این‌شکل، $s_{f\,max}$، تنشی را نشان می‌دهدکه رشته‌ها درصورت‌نبودن اثر انتهایی (بینهایت‌بودن طول) تحمل‌می‌کنند. این‌امر به‌محاسبات مثال ۱۳-۴-۱ که به‌طورخلاصه در زیرآمده است، مربوط می‌شود و به‌کسرحجم‌تقویت کننده وهمچنین به‌مدول یانگ دوماده بستگی دارد. ولی اگر رشته بریده شود تنش رشته




**شکل ۱۳-۴-۱** توزیع تنش (در مقطعی از رشته‌های‌تقویت‌شده) تنش‌رشته، $s_f$، از مقدار بیشینهٔ خود به صفر افت می‌کند. بار باید توسط تنشهای برشی، $\tau_{m/f}$، ازمیان مرزبین سطحی عبور کند و از رشته به‌زمینه برسد. زمینه در اطراف محل شکست باید تنش بیشتری، $s_m$، را تحمل‌کند.

* در این محاسبات فرض شده است‌که نسبتهای پواسون $\nu$ برای دوجزء مساوی است.

درآن نقطه به‌صفر تنزل می‌کند. دراین‌صورت بار باید توسط تنشهای برشی به‌زمینه منتقل شود. دراین انتقال بار دومسئله اهمیت دارد.

۱. پیوندبین دوماده‌باید به‌حدکافی قوی باشد تا بتواند تنشهای برشی را تحمل کند.

۲. اگر تقویت‌کننده یکپارچه باشد یا حداقل طول ظاهری $(l/d)$ آن زیاد باشد، مؤثرتر است. قطع‌شدن آن دریك‌محل، بار را به‌زمینهٔضعیفتر منتقل می‌کند. در نتیجه زمینهٔ تغییرشکل‌پذیر در اینجا مزیتی دارد، زیرا بار می‌تواند در سطح بزرگتری توزیع شود و تنشهای بیشینهٔ آن کمتر شود. (البته دراین مـوردحدی وجود دارد، زیرا زمینهٔ فوق‌العاده ضعیف کاملا می‌شکند.)

**مثال ۱۳-۴-۱** میلهٔ پلی‌وینیلیدن کلرید کـه باشیشه تقویت شده است حـاوی ۲۵ w/o رشته‌های‌شیشه‌ای بوروسیلیکات است. تمام رشته‌هادر امتداد طول قرار گرفته‌اند. چه‌کسری از بار توسط شیشه تحمل می‌شود؟

حل: (داده‌ها بااستفاده از پیوست (ج). $g/cm^3$ را به‌کاربرید) ۱ g: مبنا

$$v/o_{\text{شیشه}} = \frac{(۰٫۲۵\ g)/(۲٫۴\ g/cm^3)}{(۰٫۲۵/۲٫۴)_{gl} + (۰٫۷۵)/(۱٫۷)_{\text{پی-وی-سی}}}$$

$$= ۱۹\ v/o (= ۱۹\ \text{درصد مساحت})$$

$$\frac{\text{بار شیشه}}{A_{\text{شیشه}}E_{\text{شیشه}}} = e_{\text{شیشه}} = e_{\text{پی-وی-سی}} = \frac{\text{بار پی-وی-سی}}{A_{\text{پی-وی-سی}}E_{\text{پی-وی-سی}}}$$

$$\frac{\text{بارشیشه}}{\text{بار پی-وی-سی}} = \frac{(۰٫۱۹)(۷۰۰۰۰\ MPa)}{(۰٫۸۱)(۳۵۰\ MPa)} \simeq \frac{\%۹۸}{\%۲}$$ ▲

□ **مثال ۱۳-۴-۲** قاعدهٔ اختلاطی برای‌مدولهای یانگ‌مادهٔ لایه لایه بنویسید. درصورتی که تنش عمود بر ( ⊥ ) «دانه‌های» مادهٔ لایه‌لایه اعمال شود.

حل: با باردهی عرضی $s_1 = s = s_2$

$$\bar{E}_\perp = \frac{s_\perp}{e} = \frac{s}{e_1 f_1 + e_2 f_2}$$

$$= \frac{1}{f_1/E_1 + f_2/E_2}$$

$$\frac{1}{\bar{E}_\perp} = \frac{f_1}{E_1} + \frac{f_2}{E_2} \qquad (۱۳-۴-۵)$$

توضیح. برای به‌دست آوردن این رابطه و رابطهٔ (۱۳-۴-۴) فرض شده است که نسبت پواسون برای دوجزء تقریباً یکسان باشد و بنا بر این به‌علت اختلاف در کرنشهای جانبی، تنشهای فرعی وجود نداشته باشند. ▲

**مثال ۱۳-۴-۳** یك ورق آهنی به‌ضخامت ۲٫۵ mm که در اجاق‌خانگی به‌کار می‌رود از هر دو طرف با لعاب شیشه‌ای پوشانده شده است. فرایند نهایی در بالای نقطهٔ کرنش، ۵۰۰°C (۹۳۰ °F)، صورت می‌گیرد تا پوشش ۰٫۵ mm به‌وجود آید. شیشه مدول یانگی مساوی ۷۰۰۰۰ MPa و انبساط گرمایی ۸٫۰ × ۱۰⁻⁶/°C دارد.

الف) تنشهای موجود در شیشه در ۲۰ °C چیست؟

ب) در ۲۰۰ °C چطور؟ (فرض کنید کرنش پلاستیکی وجود ندارد.)

حل: از آنجا که $\Delta l/l =$ انبساط گرمایی + کرنش کشسان، و در این حالت $(\Delta l/l)_{Fe} = (\Delta l/l)_{شیشه}$، می‌توان نوشت

$$\alpha_{شیشه}\,\Delta T + \frac{s_{شیشه}}{E_{شیشه}} = \alpha_{Fe}\,\Delta T + \frac{s_{Fe}}{E_{Fe}}$$

الف) با استفاده از داده‌های بالا و پیوست (ج)

$$\frac{s_{Fe}}{۲۰۵۰۰۰\ \mathrm{MPa}} - \frac{s_{شیشه}}{۷۰۰۰۰\ \mathrm{MPa}} = (۸٫۰۰ - ۱۱٫۷۵)(۱۰^{-۶}/°\mathrm{C})(-۴۸۰°\mathrm{C})$$

ولی $F_{Fe} = -F_{شیشه}$ و $A_{Fe} = ۲٫۵\,A_{شیشه}$، در نتیجه $s_{شیشه} = -۲٫۵\,s_{Fe}$

$$s_{Fe}\left[\frac{۱}{۲۰۵۰۰۰} + \frac{۲٫۵}{۷۰۰۰۰}\right] = ۰٫۰۰۱۸$$

با حل این این معادله داریم

$s_{Fe} = +۴۴\ \mathrm{MPa}$ (کشش: +)

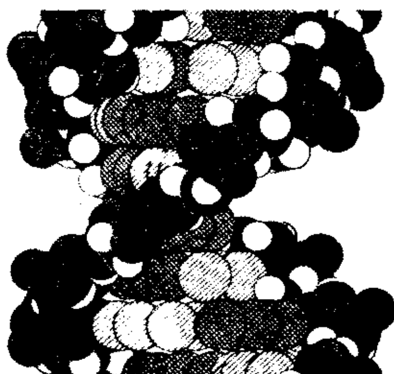
$s_{شیشه} = -۱۱۰\ \mathrm{MPa}$ (فشار: −)

ب) با محاسبات مشابه برای $\Delta T = (۵۰۰ - ۲۰۰)\ °\mathrm{C}$

$s_{Fe} = +۲۷٫۵\ \mathrm{MPa}$ و $s_{شیشه} = -۶۹\ \mathrm{MPa}$

توضیح. فرض کردیم کرنش در یك جهت باشد. در حقیقت، کرنش صفحه‌ای (یعنی دوبعدی) وجود دارد. درصورت اعمال تصحیحات لازم تنش بیشتری با ضریب $(۱-\nu)^{-۱}$ به‌دست می‌آید، که در آن، $\nu$ نسبت پواسون است (بخش ۶-۳). ▲

# مرور و بررسی مطالب

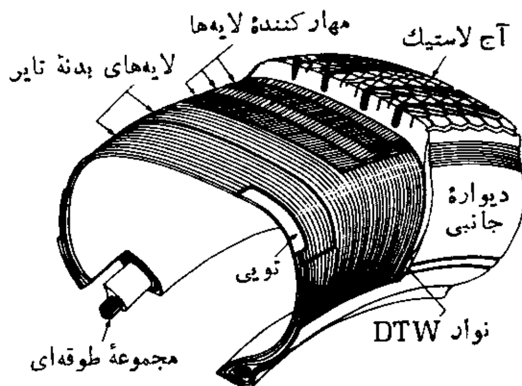


**شکل۱۳-۵-۱** ساختار زیر میکروسکوپی (مولکول DNA: مدل واتسون-کریك). اگر توسط آنزیمهای دیگر حلقه‌ها بازشوند، هریك از مولکولهای آن و مارپیچ دو تایی جدید ساختار مشابهی خواهند داشت.

## نتیجه

دراین فصل که آخرین فصل است چهارماده به‌عنوان نمونه انتخاب شده است. این چهار ماده کاربرد وسیعی دارند و بنابراین همگی با آنها آشنایی داریم. مسلماً هیچیك از اینها، مادهٔ‌ساده‌ای نیستند. ولی‌هریك از آنها خواصی‌دارندکه از ساختار داخلی آنها ناشی می‌شود. به‌طور خلاصه این مفهوم علم مواد و مهندسی آن است.

این مفهوم را می‌توان برای تمام انواع مواد گسترش داد، چه زیر میکروسکوپی باشند مثل مولکول DNA بامارپیچ دوتایی (شکل۱۳-۵-۱) و چه ماکروسکوپی باشند مثل لاستیك ماشین که دارای آج، سیم طوقه، لایه‌ها، لاستیکهای آستری و غیره است (شکل۱۳-۵-۲). مهندسی که ساختار را تحلیل می‌کند ویا ماده‌ای را برای کاربرد معینی طراحی، یا برای تکمیل‌طرحی انتخاب می‌کند بایدبه‌طور مداوم از این مفاهیم‌استفاده‌کند.




**شکل ۱۳-۵-۲** ساختارماکروسکوپی (تایر ماشین) ساختار چندسازهٔ آن رفتار محصول را درحین کارکنترل می‌کند.

## سؤالات تشریحی

۱. چرا چدن یکی از ارزانترین مواد فلزی است؟ چند دلیل ذکر کنید.
۲. تفاوت بین فرایندهایی را که منجر به، به‌وجود آمدن چدن، چدن کروی، و چکش‌خوار می‌شوند، شرح دهید.
۳. تفاوت بین فرایندهایی راکه منجر به، به‌وجود آمدن چدن فریتی، پرلیتی و بینیتی چکش‌خوار می‌شوند، شرح دهید.
۴. آیا چدن‌پرلیتی را می‌توان بدون ذوب مجدد فلز به چدن فریتی تبدیل کرد؟ اگر چنین است، چطور؟ آیا چدن فریتی‌می‌تواند بدون‌ذوب مجددفلز به‌چدن پرلیتی تبدیل شود؟ اگر چنین است، چطور؟
۵. آیا چدن خاکستری را می‌توان بدون ذوب کردن مجدد فلز به‌چدن چکش‌خوار تبدیل کرد؟ اگر چنین است، چطور؟ آیا چدن‌چکش‌خوار را می‌توان بدون ذوب‌مجدد فلز به‌چدن سفید تبدیل کرد؟ چرا؟
۶. براساس میکروساختار، انعطاف‌پذیری چدن‌فریتی خاکستری، چدن فریتی چکش‌خوار، فولاد فریتی، چدن فریتی کروی را باهم مقایسه کنید. پاسخ خود را تشریح کنید.
۷. شرح دهیدکه چرا ساختن قطعات ریختگی بزرگ از چدن چکش‌خوار ممکن نیست.
۸. فولادهایی‌که سیلیسیم‌دارند برای ساخت قطعاتی که به‌مدت‌زیاد در دمای بالانگه‌داشته می‌شوند مناسب نیستند. دلیل آن را بنویسید.
۹. چدنها معمولا به‌جای جوشکاری، لحیمکاری سخت می‌شوند.آلیاژ لحیمکاری سخت‌آن معمولا فلز پرکننده‌ای از آلیاژ مس است‌که قطعات چدن را به‌هم متصل می‌کند ولی آنها را ذوب نمی‌کند. چرا مانند فولادها آن را جوشکاری نمی‌کنیم؟
۱۰. فرض کنید ماسه از ذرات کروی تشکیل‌شده‌است. ذرات‌روی‌سرندهای تایلر براساس سطح مقطع بیشینهٔ خود چگونه مقایسه می‌شوند؟ براساس حجم چطور؟
۱۱. فرق بین چگالیهای ظاهری، انباشتی و حقیقی را شرح دهید؛ تفاوت بین تخلخل کل و تخلخل ظاهری را بنویسید.
۱۲. اگر سایر عوامل مانند شکل یکسان باشند، تخلخل‌کل ماسهٔ ریزدانه‌ای می‌تواند با تخلخل کل ماسهٔ درشت دانه‌ای برابر باشد. استثنای این امرکلی وقتی است‌که‌اندازهٔ دانه به‌اندازهٔ مخزن‌آن نزدیك شود. در این‌باره شرح دهید.
۱۳. برای آب‌دارکردن سیمان پرتلند و درنتیجه استحکام بخشیدن به‌آن، آب لازم است. ولی آب اضافی بتن را ضعیف می‌کند. در این‌باره شرح دهید.
۱۴. بسیاری فکر می‌کنند بتن‌هنگامی که سخت‌می‌شود، خشك می‌شود. اگر این‌طور باشد، چگونه پایهٔ پل در زیر آب‌جاری، سخت می‌شود؟
۱۵. ترکیب، ساختار و ویژگیهای ملاط آجر دیوار و بتن را باهم مقایسه‌کنید.
۱۶. برای صاف‌کردن سطح حیاطی بتنی بنای غیرحرفه‌ای معمولا سطح بتن‌خیس را ماله

می‌کشد. این‌کار چگونه ساختار و خواص بتن را تغییر می‌دهد؟ برای برطرف کردن نسبی این آثار چه باید کرد؟

۱۷. چرا بنا گاهی قبل از پخش کردن ملاط با آب به‌آجر نم می‌زند؟

۱۸. بلوکهای بتنی گاهی از کلوخه‌هـای سبك‌وزن ساخته می‌شوند. چگونگی ساخت این کلوخه‌های سبك‌وزن را حدس بزنید. کدامیك ازخواص این بلوکها موجب می‌شود که استفاده از آنها مقرون به‌صرفه باشد.

۱۹. چوب فشرده‌تر در مقایسه با چوب سبکتر، در هوای مرطوب، رطوبت بیشتری جذب می‌کند. چرا؟

۲۰. درعرضهای جغرافیایی‌کم بهار و تابستان وجود ندارد. دانه‌هـای چوب این نواحی چگونه‌اند؟ (به‌شکل ۱۳ــ۳ــ۱ رجوع کنید.)

۲۱. علت تحدب تابدار تارهای برش بالایی چوب درشکل ۱۳ــ۳ــ۳ چیست؟

۲۲. چرا انقباض طولی چوب درمقایسه با انقباض‌آن در سایر جهات قابل اغماض است؟

۲۳. چوبهای نرم مثل چوب‌کاج قبل از بریده‌شدن پخته می‌شوند، چرا؟

۲۴. به‌دائرة‌المعارف رجوع کنید و تفاوت بین چوب «نرم» و «سخت» را بنویسید.

۲۵. فـرق بین تختهٔ ساخته شده از ذرات را بـا تختهٔ ساخته شده از رشته‌هـا بنویسید. تفاوتهای پیش‌بینی شده در خواص آنها کدام‌اند؟

۲۶. تخته‌ای‌کـه ضخامت‌آن درجهت شعاعی است بیشتراز تخته‌ای کـه طول‌آن درجهت شعاعی است درمعرض تاب برداشتن است. چرا؟

۲۷. درحوزهٔ کار مهندسی خود،کاربردی از مـواد را انتخاب کنید. چه‌مـراحلی باید طی شوند تا ساختاراولیه و خواص‌آن مطمئناً صحیح باشند؟ آیا شرایط کار روی ساختار (و بنابراین روی‌خواص) اثر می‌گذارد؟ انتخاب‌خود را به‌صورت‌گزارشی در کلاس مطرح کنید.

## مسائل

۱۳ــ۱ــ۱ تحلیل میکروسکوپی‌چدن خاکستری ۱۲ v/o گرافیت و ۸۸ v/o فریت را نشان می‌دهد. میزان‌کربن آن را برآورد کنید.

جواب: ۳٫۷٪ C، و ۹۶٫۳٪ (Fe+Si)

۱۳ــ۱ــ۲ چگالی چدن خاکستری فریتی (۳٫۵٪ C) را برآورد کنید.

۱۳ــ۱ــ۳ چدن سفیدی حاوی ۵٫۰٪ سیلیسیم و ۳٪کربن است. الف) درصورتی‌که فلز در ۸۰۰°C چکش‌خوار شده باشد مقدار تقریبی‌کربن در $\gamma$ چقدر است؟ ب) درآن دمـا چه مقدار گرافیت تشکیل خواهد شد؟

جواب: الف) تقریباً ۰٫۹۵٪ C ب) تقریباً ۲٪ گرافیت

**۱۳-۱-۴** چگالی آهن چکش‌خوار پرلیتی موجود در مسئلهٔ ۱۳-۱-۳ را برآورد کنید. (داده‌های لازم را ازمثال ۱۳-۱-۳ به‌دست آورید.)

**۱۳-۱-۵** عملیات گرمایی‌لازم برای ایجاد چدن‌چکش‌خوار بینیتی کدام‌اند؟ دلیلی برای انتخاب خود ذکر کنید.

**۱۳-۱-۶** عملیات گرمایی لازم برای ایجادچدن چکش‌خوار پرلیتی‌کدام‌اند؟ دلیلی برای انتخاب خود ذکر کنید.

۱۳-۲-۱ نمونه‌ای از بـازالت خرد شده پس‌از آنکه‌کاملا خشك‌شد، ۴۸۲ g وزن دارد. وقتی آن را در استوانهٔ درجه‌بندی شدهٔ بزرگی می‌ریزیم سطح آب آن از ۴۵۲ $cm^3$ به ۶۳۰ $cm^3$ می‌رسد. پس‌از آنکه آب را از استوانه بیرون ریختیم، درحالی‌که هنوز آب سطحی باقی مانده است، نمونه ۴۸۷g وزن دارد. الف) حجم‌ظـاهری آن چقدر است؟ حجم‌کل ذرات چقدر است؟ ب) تخلخل بار ذرات خردشده چقدر است؟ چگالی ظاهری را نیز به‌دست آورید.

جواب: الف) ۱۷۸ $cm^3$، ۱۸۲ $cm^3$ ب) ۲٫۷ v/o
ج) ۲٫۶۵ $g/cm^3$(= ۲٫۶۵ $Mg/m^3$)

**۱۳-۲-۲** به‌منظور تعیین حجم یك بلوك ساختمانی بتنی بـاشکل نامنظم، سه‌اندازه گیری به‌عمل آمده‌است. وزن (خشك): ۱۷٫۵۷ kg؛ وزن (اشباع‌شده با آب) = ۱۸/۹۳ kg؛ وزن (معلق در آب) = ۱۰٫۴۳ kg. الف) حجم انباشتی بلـوك چقدر است؟ ب) حجم ظاهری بلوك چقدر است؟

۱۳-۲-۳ چگالی انباشتی سنگ آهـك خـرد شده‌ای پس از بـار زدن در کـامیون ۱٫۸۲۷ $Mg/m^3$ است. درصورتی که چگالی حقیقی سنگ آهك ۲٫۷ $Mg/m^3$ باشد تخلخل کل آن چقدر است؟

جواب: ۳۲ v/o

**۱۳-۲-۴** کامیون حمل مصالح ساختمانی کوچکی‌هنگامی‌که پر باشد ۳۵۰۰ kg سنگریزه حمل می‌کند (ظرفیت = ۲ $m^3$). چگالی ظاهری این سنگریزه توسط قرار دادن ۵ kg از آن در بشری به‌حجم ۰٫۰۱۲۵ $m^3$ انـدازه‌گیری شده است. آب و سنگریزه دارای وزن خالص ۱۵٫۶ kg هستند. الف) چگالی ظاهری سنگریزه چقدر است؟ ب) چه‌حجمی‌ماسه باید به‌داخل این‌کامیون سنگریزه ریخته شود تا بیشترین ضریب فشردگی به‌دست آید؟

۱۳-۲-۵ مخلوطی ازبتن شامل حجمهای زیر است (برمبنای دریـافت شده): سیمان، ۱؛ مـاسه، ۲٫۲۵؛ شن، ۲٫۸۵؛ آب، ۰٫۸ با استفاده از داده‌های مثال ۱۳-۲-۳، حجم نهایی این مخلوط را محاسبه کنید.

جواب: ۶ر۴ (می‌تواند $m^3$، $cm^3$ یا $Ft^3$ باشد.)

۱۳–۲–۶ مخلوط واحدی از بتن‌حاوی ۴۲٫۷ kg سیمان، ۱۲۵ kg ماسه، ۱۶۰ kg سنگریزه، و ۲۱ kg آب است. با استفاده از داده‌های مثال ۱۳–۲–۳، تعداد مخلوطهای واحد لازم برای راهی با حجم ۲۰ $m^3$ را حساب کنید.

**۱۳–۲–۷** بر اساس وزن خشک، مخلوط واحدی از بتن حاوی ۷ر۲ سنگریزه، ۲ر۲ ماسه و ۱ سیمان، به‌علاوه ۵۵ر۰ آب است. سنگریزه همان است که درمثال ۱۳–۲–۱ آمده بود، ولی خشک نیست. درعوض ذرات کلوخه باآب اشباع شده است. (شکافها و منفذهای بازپر شده‌اند). مخلوط واحد را چگونه باید تنظیم کرد؟

جواب: ۴۶ر۰ واحد $H_2O$، به‌جای ۵۵ر۰

۱۳–۲–۸ مخلوط موجوددر مسئلهٔ ۱۳–۲–۵ بامخلوط سیمان، ۱؛ ماسه، ۲؛ سنگریزه، ۵ر۲؛ و آب ۷ر۰ عوض شده است. به‌علاوه، ۴ v/o هوا به‌آن داده شده است. حجم مخلوط نهایی چقدر است؟

۱۳–۲–۹ سیمانی حاوی ۱۰٪ $Ca_3Al_2O_6$، ۲۵٪ $Ca_3SiO_5$، و ۶۵٪ $Ca_2SiO_4$ است. در اولین مراحل خودگیری، دما ۷ °C بالارفته است. اگر این‌مخلوط بتن بامخلوط موجود در مثال ۱۳–۲–۴ قابل مقایسه باشد، پس از این مرحلهٔ اولیه چند درصد از کل گرمای آبدار کردن باقی می‌ماند.

جواب: ۱۱٪

۱۳–۳–۱ چگالی انباشتی مقداری چوب‌خشک تقریباً برابر ۵۴g/cm³ر۰ است. درصورتی که چگالی حقیقی چوب خشک ۵ر۱ $g/cm^3$ (= ۵ر۱ $Mg/m^3$) باشد، درصد تخلخل را برآورد کنید.

جواب: ۶۴ v/o کل تخلخل.

**۱۳–۳–۲** تخته‌ای‌که طول آن درجهت شعاعی است از چوب صنوبر داگلاس، وقتی که ۱۸ درصد رطوبت داشته به‌اندازهٔ ۱۸mm × ۹۱mm (اسماً ۱ × ۴) بریده شده است. اگر دوسوم رطوبت خود را از دست بدهد، سطح مقطع آن چه ابعادی خواهد داشت؟

**۱۳–۳–۳** میزان رطوبت چوب درحالت تعادل می‌تواند از ۶ درصد در زمستان تا ۱۴ درصد در تابستان تغییر کند. تغییرابعاد ششماههٔ سطح میزی از صنوبر داگلاس به‌ابعاد ۹۰۰mm × ۱۵۰۰mm × ۲۰mm را محاسبه‌کنید. الف) وقتی که طول آن درجهت شعاعی اره شده باشد (پهنای آن شعاعی است)؛ ب) وقتی ضخامت آن درجهت شعاعی اره شده باشد (پهنای آن مماسی است).

جواب: الف) $\Delta w = ۱۱\ mm$ ‏ $\Delta t = ۰٫۴\ mm$ ‏ $\Delta l =$ هیچ

ب) $\Delta w = ۱۸ \text{ mm}$ $\quad \Delta t = ۰٫۲ \text{ mm} \quad \Delta l =$ هیچ

**۱۳-۳-۴** در ساخته‌شده در مثال ۱۳-۳-۱ بسته شده سپس میزان رطوبت از ۹ درصد به ۱۴ درصد افزایش یافته است. اگر در ۳۰ mm ضخامت داشته باشد چه نیرویی در آن به‌وجود می‌آید؟ فرض کنید که زهوارهای در صلب باشد.

**۱۳-۳-۵** در مسئلهٔ ۱۳-۳-۳ قسمت (الف)، فرض کنید که لبه‌های میز در فصل تابستان با بست گرفته‌شده‌است. اگر $S_t = ۱۱۰\text{MPa}$، آیا سطح میز در زمستان شکاف برمی‌دارد؟ در صورتی که گستره‌های آن معلوم باشد. مقادیر فرضی خود را ذکر کنید.

جواب: فرض کنید $S_l = ۲۰S_r$، و از مقدار بحرانیتر مدول یانگ استفاده کنید. در نتیجه چوب شکاف برخواهد داشت. $S = ۱۲ \text{ MPa} > ۵٫۵ \text{ MPa}$

**۱۳-۳-۶** روکش چوب درخت غوشه به‌فنل فرم‌آلدئید آغشته شده‌است [شکل ۷-۴-۱ (ب)] تا مقاومت آن در برابر آب زیاد شود ومنحنی محصول نهایی بالا رود. اگرچه روکش خشك فقط ۰٫۵۶ $g/cm^3$ وزن دارد، وزن مخصوص واقعی ترکیب سلولز - لیگنین برابر ۱٫۵۲ است. الف) برای آغشته‌کردن ۱۰۰۰۰ $mm^3$ چوب درخت غوشه، چند گرم فنل‌فرم‌آلدئید (PF) لازم است؟ ب) چگالی نهایی چقدر است؟

جواب: الف) ۸٫۲ g PF ب) ۱٫۳۸ $g/cm^3$ (= ۱٫۳۸ $Mg/m^3$)

**۱۳-۳-۷** از زمستان تا تابستان، سطح میز مسئلهٔ ۱۳-۳-۳ چه مقدار آب جذب می‌کند در صورتی‌که جنس آن الف) از بالزا (۰٫۱۶ $g/cm^3$ خشك) و ب) از چوب غوشه (۰٫۵۶ $g/cm^3$ خشك) باشد؟ علت جذب بیشتر چوب غوشه را توضیح دهید.

جواب: الف) ۳۵۰ g~ ب) ۱۲۰۰g~

۱۳-۴-۱ مدول کشسانی میله‌ای از پلی‌استیرن را که با شیشهٔ بوروسیلیکات تقویت‌شده وتمام رشته‌های شیشه درجهت طولی قرار گرفته‌اند، حساب کنید. ۸۰ w/o شیشه وجود دارد.

جواب: ۴۶۰۰۰ MPa

۱۳-۴-۲ مدول کشسانی برای دولایهٔ غیر هم‌جهت مسئلهٔ ۱۰-۴-۷ چقدر است؟

**۱۳-۴-۳** میلهٔ پلاستیکی تقویت شده با شیشه‌ای (چوب ماهیگیری) از ۶۷ v/o شیشهٔ بوروسیلیکات در زمینهٔ پلی‌استیرن ساخته شده است. ضریب انبساط گرمایی چقدر است؟

جواب: $\sim ۲ \times ۱۰^{-۶}/°C$

**۱۳-۴-۴** سیمی از فولاد AISI-SAE ۱۰۴۰ (با سطح مقطع ۱ $mm^2$) دارای روکشی آلومینیمی است، به‌طوری که کل سطح مقطع ۱٫۲ $mm^2$ است. الف) چه کسری از بار

N ۴۵۰ توسط فولاد حمل می‌شود؟ ب) مقاومت الکتریکی این‌سیم در واحد طول چقدر است؟

**۱۳-۴-۵** سیم فولادی ۵ر۲ میلی‌متری با mm ۵ر۰ مس پوشانده شده است (کل قطر = mm ۵ر۳). این سیم تحت بار N ۴۴۵۰ قرار داده شده‌است. الف) کرنش کشسان چقدر است؟ ب) اگر کل قطر از فولاد ۱۰۴۰ تشکیل شده باشد چه‌مقدار کرنش صورت می‌گیرد؟ ج) اگر کل سیم از مس باشد چطور؟

جواب: الف) ۰۰۳ر۰

**۱۳-۴-۶** فولاد ۱۰۲۰ مسئلهٔ‌قبل‌که روکش مسی‌دارد، در $400\ ^\circ C$ ($750\ ^\circ F$) تنشگیری و سریعاً تا $10\ ^\circ C$ ($50\ ^\circ F$) سرد شده است. الف) کدام فلز تحت کشش است؟ ب) تنش چقدر است؟

**۱۳-۴-۷** به‌سیم فولادی ۵ر۲ میلی‌متری ($\rho = 200\ \Omega \cdot nm$) مـی‌خواهیم روکشی از مس دهیم به‌طوری‌که مقاومت آن $3.3 \times 10^{-3}\ \Omega/m$ شود. ضخامت‌روکش چقدر باید باشد؟

جواب: mm ۵ر۰

# پیوستها

الف) ثابتها و ضرایب تبدیل
ب) جدول عناصر مهم
ج) خواص مواد مهم مهندسی (۲۰ °C)
د) فرهنگ اصطلاحات

## پیوست الف. ثابتها و ضرایب تبدیل

**ثابتها***

| | |
|---|---|
| شتاب ثقل، $g$ | ۹٫۸۰۰... $m/s^{۲}$ |
| واحد جرم اتمی، amu | ۱٫۶۶۰۰... × $۱۰^{-۲۴}$ g |
| عدد آوگادرو، $N$ | ۰٫۶۰۲۲... × $۱۰^{۲۴}$ $mole^{-۱}$ |
| ثابت بولستمان، $k$ | ۸۶٫۱۰۰... × $۱۰^{-۶}$ eV/K |
| | ۱۳٫۸... × $۱۰^{-۱۴}$ J/K |
| | ۸٫۳۱ J/mole·K |
| ظرفیت (خلأ)، $\varepsilon$ | ۸٫۸۵... × $۱۰^{-۱۲}$ C/V·m |
| بار الکترون، $q$ | ۰٫۱۶۰۲... × $۱۰^{-۱۸}$ C |
| گشتاور الکترون، $\beta$ | ۹٫۲۷... × $۱۰^{-۲۴}$ A·$m^{۲}$ |
| الکترون ولت، eV | ۰٫۱۶۰... × $۱۰^{-۱۸}$ J |
| فاراده، $\mathcal{F}$ | ۹۶٫۵... × $۱۰^{۳}$ C |
| ترکیب اوتکتوئید $Fe-Fe_{۳}C$ | ۰٫۷۷ w/o کربن |
| دمای اوتکتوئید $Fe-Fe_{۳}C$ | ۷۲۷ °C (۱۳۴۰ °F) |
| ثابت گازها، $R$ | ۸٫۳۱... J/mole·K |
| | ۱٫۹۸۷...cal/mole·K |
| حجم گاز (STP) | ۲۲٫۴... × $۱۰^{-۳}$ $m^{۳}$/mole |
| ثابت پلانک، $h$ | ۰٫۶۶۲... × $۱۰^{-۳۳}$ J·s |
| سرعت نور، $c$ | ۰٫۲۹۹... × $۱۰^{۹}$ m/s |

**ضرایب تبدیل***

۱ آمپر = ۱C/s

۱ آنگستروم = $۱۰^{-۱۰}$ m

= $۱۰^{-۸}$cm

= ۰٫۱ nm

---

* تمام مقادیر بی معنی، به عدد کوچکتر گرد شده‌اند.

$= ۳٫۹۳۷ \times ۱۰^{-۹} \text{in}$

$۱ \text{ amu} = ۱٫۶۶۰\ldots \times ۱۰^{-۲۴} \text{g}$

$۱ \text{ Btu} = ۱٫۰۵۵\ldots \times ۱۰^{۳} \text{J}$

$۱ \text{ Btu}/°\text{F} = ۱٫۸۹۹\ldots \times ۱۰^{۳} \text{J}/°\text{C}$

$۱ [\text{Btu}/(\text{ft}^{۲} \cdot \text{s})]/[°\text{F}/\text{in}] = ۰٫۵۱۹\ldots \times ۱۰^{۳}[(\text{J}/(\text{m}^{۲} \cdot \text{s})]/[°\text{C}/\text{m}]$

$= ۰٫۵۱۹ \times ۱۰^{۳}(\text{W}/\text{m}^{۲})/(°\text{C}/\text{m})$

$۱ \text{ Btu} \cdot \text{ft}^{۲} = ۱۱٫۳۰\ldots \times ۱۰^{۳} \text{J}/\text{m}^{۲}$

۱ کالری گرم = ۴٫۱۸۰... J

۱ سانتی‌متر = $۱۰^{-۲}$m

= ۰٫۳۹۳۷ in

۱ کولن = ۱ A . s

۱ سانتی‌متر مکعب = ۰٫۰۶۱۰...$\text{in}^{۳}$

۱ اینچ مکعب = ۱۶٫۳۰... × $۱۰^{-۶}\text{m}^{۳}$

۱ °Cاختلاف = ۱٫۸ °F

۱ الکترون ولت = ۰٫۱۶۰... × $۱۰^{-۱۸}$ J

۱ °Fاختلاف = ۰٫۵۵۵ ... °C

۱ فوت = ۰٫۳۰۴۸ ... m

۱ پوند نیرو . فوت = ۱٫۳۵۵ ... J

۱ گالن (واحدمایعات در آمریکا) = ۳٫۷۸ ... × $۱۰^{-۳}\text{m}^{۳}$

۱ گرم = ۰٫۶۰۲... × $۱۰^{۲۴}$amu

۱ گرم/$\text{cm}^{۳}$ = ۲٫۲۰... × $۱۰^{-۳}\text{lb}_m$

= ۶۲٫۴ ... $\text{lb}_m/\text{ft}^{۳}$

= ۱۰۰۰ $\text{kg}/\text{m}^{۳}$

= ۱ $\text{Mg}/\text{m}^{۳}$

۱ اینچ = ۰٫۰۲۵۴ ... m

۱ ژول = ۰٫۹۴۷ ... × $۱۰^{-۳}$Btu

= ۰٫۲۳۹ ... cal, g

= ۶ر۲۴... $\times$ $۱۰^{۱۸}$ eV

= ۰ر۷۳۷... ft $lb_f$

= ۱ وات . ثانیه

۱ ژول برمترمربع = ۸ر۸۰... $\times$ $۱۰^{-۵}$ Btu/$ft^۲$

۱ [ژول/($m^۲$ . s)]/[°C/m] = ۱ر۹۲ $\times$ $۱۰^{-۳}$ [Btu/($ft^۲$.s)]/[°F/in]

۱ کیلوگرم = ۲ر۲۰ ... $lb_m$

۱ مگاگرم برمترمکعب = ۱ g/$cm^۳$

= $۱۰^۶$ g/$m^۳$

= ۱۰۰۰ kg/$m^۳$

۱ متر = $۱۰^{۱۰}$ Å

= $۱۰^۹$ nm

= ۳ر۲۸ ... ft

= ۳۹ر۳۷ in

۱ میکرومتر = $۱۰^{-۶}$ m

۱ نانومتر = $۱۰^{-۹}$ m

۱ نیوتن = ۰ر۲۲۴ ... $lb_f$

۱ اهم . اینچ = ۰ر۰۲۵۴ ... Ω . m

۱ اهم . متر = ۳۹ر۳۷ Ω . in

۱ پاسکال = ۰ر۱۴۵ ... $\times$ $۱۰^{-۳}$ $lb_f/in^۲$

۱ پواز = ۰ر۱ Pa.s

۱ پوند (نیرو) = ۴ر۴۴ ... نیوتن

۱ پوند (جرم) = ۰ر۴۵۳ ... kg

۱ پوند برفوت مکعب = ۱۶ر۰ ... kg/$m^۳$

۱ پوند براینچ مربع = ۶ر۸۹ ... $\times$ $۱۰^{-۳}$ MPa

۱ وات = ۱ J/s

۱ (وات/$m^۲$)/(°C/m) = ۱ر۹۲ ... $\times$ $۱۰^{-۳}$ [Btu/($ft^۲$ . s)]/[°F/in]

## پیشوندهای سیستم متریک

| | | |
|---|---|---|
| گیگا | G | $۱۰^{۹}$ |
| مگا | M | $۱۰^{۶}$ |
| کیلو | k | $۱۰^{۳}$ |
| میلی | m | $۱۰^{-۳}$ |
| میکرو | $\mu$ | $۱۰^{-۶}$ |
| نانو | n | $۱۰^{-۹}$ |

# پیوست ب. جدول عناصرمهم

| عنصر | نشانه | عدد اتمی | جرم اتمی، amu | اربیتالها | نقطهٔ ذوب، °C | چگالی (جامد) $Mg/m^3$ $(=g/cm^3)$ | ساختار بلوری، ۲۰°C | شعاع اتمی تقریبی، nm* | ظرفیت (معمولترین) | شعاع یونی، تقریبی nm** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| | | | | 1s | | | | | | |
| هیدروژن | H | ۱ | ۱ر۰۰۷۸ | ۱ | −۲۵۹ر۱۴ | — | — | ۰ر۰۴۶ | ۱+ | خیلی کم |
| هلیم | He | ۲ | ۴ر۰۰۳ | ۲ | −۲۷۲ر۲ | — | — | ۰ر۱۷۶ | خنثی | — |
| | | | | ۲s ۲p | | | | | | |
| لیتیم | Li | ۳ | ۶ر۹۴ | He+۱ | ۱۸۰ | ۰ر۵۳۴ | dcc | ۰ر۱۵۱۹ | ۱+ | ۰ر۰۶۸ |
| بریلیم | Be | ۴ | ۹ر۰۱ | He+۲ | ۱۲۸۹ | ۱ر۸۵ | hcp | ۰ر۱۱۴ | ۲+ | ۰ر۰۳۵ |
| بور | B | ۵ | ۱۰ر۸۱ | He+۲ ۱ | ۲۱۰۳ | ۲ر۳۴ | — | ۰ر۰۴۶ | ۳+ | ~۰ر۰۲۵ |
| کربن | C | ۶ | ۱۲ر۰۱۱ | He+۲ ۲ | >۳۵۰۰ | ۲ر۲۵ | hex | ۰ر۰۷۷ | — | — |
| نیتروژن | Ni | ۷ | ۱۴ر۰۰۷ | He+۲ ۳ | − ۲۱۰ | — | — | ۰ر۰۷۱ | −۳ | — |
| اکسیژن | O | ۸ | ۱۵ر۹۹۹ | He+۲ ۴ | − ۲۱۸ر۴ | — | — | ۰ر۰۶۰ | −۲ | ۰ر۱۴۰ |
| فلوئور | F | ۹ | ۱۹ر۰۰ | He+۲ ۵ | − ۲۲۰ | — | — | ۰ر۰۶ | −۱ | ۰ر۱۳۳ |
| نئون | Ne | ۱۰ | ۲۰ر۱۸ | He+۲ ۶ | − ۲۴۸ر۷ | — | fcc | ۰ر۱۶۰ | خنثی | — |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | ۳$s$ ۳$p$ | | | | | | | |
| سدیم | Na | ۱۱ | ۲۲٫۹۹ | | Ne+۱ | ۹۷٫۸ | ۰٫۹۷ | bcc | ۰٫۱۸۵۷ | ۱+ | ۰٫۰۹۷ |
| منیزیم | Mg | ۱۲ | ۲۴٫۳۱ | | Ne+۲ | ۶۴۹ | ۱٫۷۴ | hcp | ۰٫۱۶۱ | ۲+ | ۰٫۰۶۶ |
| آلومینیم | Al | ۱۳ | ۲۶٫۹۸ | ۱ | Ne+۲ | ۶۶۰٫۴ | ۲٫۷۰ | fcc | ۰٫۱۴۳۱۵ | ۳+ | ۰٫۰۵۱ |
| سیلیسیم | Si | ۱۴ | ۲۸٫۰۹ | ۲ | Ne+۲ | ۱۴۱۴ | ۲٫۳۳ | ••• | ۰٫۱۱۷۶ | ۴+ | ۰٫۰۴۲ |
| فسفر | P | ۱۵ | ۳۰٫۹۷ | ۳ | Ne+۲ | ۴۴ | ۱٫۸ | — | ۰٫۱۱ | ۵+ | ~۰٫۰۳۵ |
| گوگرد | S | ۱۶ | ۳۲٫۰۶ | ۴ | Ne+۲ | ۱۱۲٫۸ | ۲٫۰۷ | — | ۰٫۱۰۶ | ۲− | ۰٫۱۸۴ |
| کلر | Cl | ۱۷ | ۳۵٫۴۵ | ۵ | Ne+۲ | −۱۰۱ | — | — | ۰٫۰۹۰۵ | ۱− | ۰٫۱۸۱ |
| آرگون | Ar | ۱۸ | ۳۹٫۹۵ | ۶ | Ne+۲ | −۱۸۹٫۲ | — | fcc | ۰٫۱۹۲ | خنثی | — |
| | | | | ۳$d$ ۴$s$ ۴$p$ | | | | | | | |
| پتاسیم | K | ۱۹ | ۳۹٫۱۰ | ۱ | Ar+ | ۶۳ | ۰٫۸۶ | bcc | ۰٫۲۳۱۲ | ۱+ | ۰٫۱۳۳ |
| کلسیم | Ca | ۲۰ | ۴۰٫۰۸ | ۲ | Ar+ | ۸۴۰ | ۱٫۵۴ | fcc | ۰٫۱۹۶۹ | ۲+ | ۰٫۰۹۹ |
| تیتانیم | Ti | ۲۲ | ۴۷٫۹۰ | ۲ | Ar+۲ | ۱۶۷۲ | ۴٫۵۱ | hcp | ۰٫۱۴۶ | ۴+ | ۰٫۰۶۸ |
| کروم | Cr | ۲۴ | ۵۲٫۰۰ | ۱ | Ar+۵ | ۱۸۶۳ | ۷٫۲۰ | bcc | ۰٫۱۲۴۹ | ۳+ | ۰٫۰۶۳ |
| منگنز | Mn | ۲۵ | ۵۴٫۹۴ | ۲ | Ar+۵ | ۱۲۴۶ | ۷٫۲ | — | ۰٫۰۱۱۲ | ۲+ | ۰٫۰۸۰ |
| آهن | Fe | ۲۶ | ۵۵٫۸۵ | ۲ | Ar+۶ | ۱۵۳۸ | ۷٫۸۸ | bcc | ۰٫۱۲۴۱ | ۲+ | ۰٫۰۷۴ |
| | | | | | | | | fcc | ۰٫۱۲۶۹ | ۳+ | ۰٫۰۶۴ |

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| کبالت | Co | ۲۷ | ۵۸٫۹۳ | ۲ | | Ar+۷ | ۱۴۹۲ | ۸٫۹ | hcp | ۰٫۱۲۵ | ۲+ | ۰٫۰۷۲ |
| نیکل | Ni | ۲۸ | ۵۸٫۷۱ | ۲ | | Ar+۸ | ۱۴۵۵ | ۸٫۹۰ | fcc | ۰٫۱۲۴۶ | ۲+ | ۰٫۰۶۹ |
| مس | Cu | ۲۹ | ۶۳٫۵۴ | ۱ | | Ar+۱۰ | ۱۰۸۴٫۵ | ۸٫۹۲ | fcc | ۰٫۱۲۷۸ | ۱+ | ۰٫۰۹۶ |
| روی | Zn | ۳۰ | ۶۵٫۳۷ | ۲ | | Ar+۱۰ | ۴۱۹٫۶ | ۷٫۱۴ | hcp | ۰٫۱۳۹ | ۲+ | ۰٫۰۷۴ |
| ژرمانیم | Ge | ۳۲ | ۷۲٫۵۹ | ۲ | ۲ | Ar−۱۰ | ۹۳۷ | ۵٫۳۵ | ••• | ۰٫۱۲۲۴ | ۴+ | — |
| ارسنیك | As | ۳۳ | ۷۴٫۹۲ | ۲ | ۳ | Ar+۱۰ | ~۸۰۹ | ۵٫۷۳ | — | ۰٫۱۲۵ | ۳+ | — |
| کریپتون | Kr | ۳۶ | ۸۳٫۸۰ | ۲ | ۶ | Ar+۱۰ | −۱۵۷ | — | fcc | ۰٫۲۰۱ | خنثی | — |
| | | | | ۵s | ۵p | ۴d | | | | | | |
| نقره | Ag | ۴۷ | ۱۰۷٫۸۷ | ۱ | | Kr+۱۰ | ۹۶۱٫۹ | ۱۰٫۵ | fcc | ۰٫۱۴۴۴ | ۱+ | ۰٫۱۲۶ |
| قلع | Sn | ۵۰ | ۱۱۸٫۶۹ | ۲ | ۲ | Kr+۱۰ | ۲۳۲ | ۷٫۳ | bct | ۰٫۱۵۰۹ | ۴+ | ۰٫۰۷۱ |
| آنتیموان | Sb | ۵۱ | ۱۲۱٫۷۵ | ۲ | ۳ | Kr+۱۰ | ۶۳۰٫۷ | ۶٫۷ | — | ۰٫۱۴۵۲ | ۵+ | — |
| ید | I | ۵۳ | ۱۲۶٫۹ | ۲ | ۵ | Kr+۱۰ | ۱۱۴ | ۴٫۹۳ | مکعب مستطیلی | ۰٫۱۳۵ | ۱− | ۰٫۲۲۰ |
| گزنون | Xe | ۵۴ | ۱۳۱٫۳ | ۲ | ۶ | Kr+۱۰ | −۱۱۲ | ۲٫۷ | fcc | ۰٫۲۲۱ | خنثی | — |

**پیوست ب (ادامه)**

| عنصر | نشانه | عدد اتمی | جرم اتمی، amu | ۶s | ۵d | ۴f | اربیتالها | نقطهٔ ذوب، °C | چگالی (جامد) $Mg/m^۳$ $(=g/cm^۳)$ | ساختار بلوری، ۲۰°C | شعاع اتمی تقریبی، nm* | ظرفیت (معمولترین) | شعاع یونی، تقریبی** nm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| سزیم | Cs | ۵۵ | ۱۳۲٫۹ | ۱ | | | Xe+ | ۲۸٫۴ | ۱٫۹ | bcc | ۰٫۲۶۲ | ۱+ | ۰٫۱۶۷ |
| تنگستن | W | ۷۴ | ۱۸۳٫۹ | ۲ | ۴ | ۱۴ | Xe+ | ۳۳۸۷ | ۱۹٫۴ | bcc | ۰٫۱۳۶۷ | ۴+ | ۰٫۱۶۷ |
| طلا | Au | ۷۹ | ۱۹۷٫۰ | ۱ | ۱۰ | ۱۴ | Xe+ | ۱۰۶۴٫۴ | ۱۹٫۳۲ | fcc | ۰٫۱۴۴۱ | ۱+ | ۰٫۱۳۷ |
| جیوه | Hg | ۸۰ | ۲۰۰٫۶ | ۲ | ۱۰ | ۱۴ | Xe+ | ۳۸٫۸۶− | — | — | ۰٫۱۵۵ | ۲+ | ۰٫۱۱۰ |
| سرب | Pb | ۸۲ | ۲۰۷٫۲ | | | | $Hg+۶p^۲$ | ۳۲۷٫۵ | ۱۱٫۳۴ | fcc | ۰٫۱۷۵۰ | ۲+ | ۰٫۱۲۰ |
| اورانیم | U | ۹۲ | ۲۳۸٫۰ | | | | $Rn+۵f^۳۶fd\ ۷s^۲$ | ۱۱۳۳ | ۱۹ | — | ۰٫۱۳۸ | ۴+ | ۰٫۰۹۷ |

* نصف نزدیکترین فاصلهٔ بین دو اتم در عنصر جامد. برای ساختارهای غیرمکعبی، میانگین فاصلهٔ اتمی داده شده است.مثلا در hcp اتماندکی بیضی‌شکل است.

** شعاع برای CN=۶؛ درغیر این‌صورت، $R_{CN=۴}$ ۱٫۱ ≈ $R_{CN=۶}$ ≈ $R_{CN=۷}$۰٫۹۷.

*** مکعب الماسی.

## پیوست ج. خواص مواد مهم مهندسی (۲۰°C)*

| ماده | چگالی، $Mg/m^۳$ $(=g/cm^۳)$ | رسانندگی گرمایی، $\left(\frac{وات}{mm^۲}\right) \left(\frac{°C}{mm}\right)^{**}$ | انبساط خطی، $°C^{-۱***}$ | مقاومت ویژهٔ الکتریکی، اهم-متر**** | میانگین مدول کشسان، $\bar{E}$ MPa | میانگین مدول کشسان، $\bar{E}$ Psi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **فلزات** | | | | | | |
| آلومینیم (+۹ر۹۹) | ۲ر۷ | ۰ر۲۲ | $۲۲ر۵ \times ۱۰^{-۶}$ | $۲۹ \times ۱۰^{-۹}$ | ۷۰۰۰۰ | $۱۰ \times ۱۰^{۶}$ |
| آلیاژهای آلومینیم | ۲ر۷(+) | ۰ر۱۶ | $۲۲ \times ۱۰^{-۶}$ | $\sim ۴۵ \times ۱۰^{-۹}$ | ۷۰۰۰۰ | $۱۰ \times ۱۰^{۶}$ |
| برنج (۷۰Cu-۳۰Zn) | ۸ر۵ | ۰ر۱۲ | $۲۰ \times ۱۰^{-۶}$ | $۶۲ \times ۱۰^{-۹}$ | ۱۱۰۰۰۰ | $۱۶ \times ۱۰^{۶}$ |
| مفرغ (۹۵Cu-۵Sn) | ۸ر۸ | ۰ر۰۸ | $۱۸ \times ۱۰^{-۶}$ | $\sim ۱۰۰ \times ۱۰^{-۹}$ | ۱۱۰۰۰۰ | $۱۶ \times ۱۰^{۶}$ |
| چدن (خاکستری) | ۷ر۱۵ | — | $۱۰ \times ۱۰^{-۶}$ | — | ۱۴۰۰۰۰(±) | $۲۰ \times ۱۰^{۶} \pm$ |
| چدن (سفید) | ۷ر۷ | — | $۹ \times ۱۰^{-۶}$ | $۶۶۰ \times ۱۰^{-۹}$ | ۲۰۵۰۰۰ | $۳۰ \times ۱۰^{۶}$ |
| مس (+۹ر۹۹) | ۸ر۹ | ۰ر۴۰ | $۱۷ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۷ \times ۱۰^{-۹}$ | ۱۱۰۰۰۰ | $۱۶ \times ۱۰^{۶}$ |
| آهن (+۹ر۹۹) | ۷ر۸۸ | ۰ر۰۷۲ | $۱۱ر۷ \times ۱۰^{-۶}$ | $۹۸ \times ۱۰^{-۹}$ | ۲۰۵۰۰۰ | $۳۰ \times ۱۰^{۶}$ |
| سرب (+۹۹) | ۱۱ر۳۴ | ۰ر۰۳۳ | $۲۹ \times ۱۰^{-۶}$ | $۲۰۶ \times ۱۰^{-۹}$ | ۱۴۰۰۰ | $۲ \times ۱۰^{۶}$ |
| منیزیم (+۹۹) | ۱ر۷۴ | ۰ر۱۶ | $۲۵ \times ۱۰^{-۶}$ | $۴۵ \times ۱۰^{-۹}$ | ۴۵۰۰۰ | $ر۵ \times ۱۰^{۶}$ |
| مونل (۷۰Ni-۳۰Cu) | ۸ر۸ | ۰ر۰۲۵ | $۱۵ \times ۱۰^{-۶}$ | $۴۸۲ \times ۱۰^{-۹}$ | ۱۸۰۰۰۰ | $۲۶ \times ۱۰^{۶}$ |
| نقره (استرلینگ) | ۱۰ر۴ | ۰ر۴۱ | $۱۸ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۸ \times ۱۰^{-۹}$ | ۷۵۰۰۰ | $۱۱ \times ۱۰^{۶}$ |
| فولاد (۱۰۲۰) | ۷ر۸۶ | ۰ر۰۵۰ | $۱۱ر۷ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۶۹ \times ۱۰^{-۹}$ | ۲۰۵۰۰۰ | $۳۰ \times ۱۰^{۶}$ |

| اده | چگالی، $Mg/m^3$ $(=g/cm^3)$ | رسانندگی گرمایی، $\left(\frac{وات}{mm^2}\right)\left(\frac{°C}{mm}\right)$ | انبساط خطی، $°C^{-1}$ | مقاومت ویژهٔ الکتریکی، اهم-متر | میانگین مدول کشسان، $E$ MPa | میانگین مدول کشسان، $E$ Psi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| لاد (۱۰۴۰) | ۷٫۸۵ | ۰٫۰۴۸ | $۱۱٫۳ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۷۱ \times ۱۰^{-۹}$ | ۲۰۵۰۰۰ | $۳۰ \times ۱۰^{۶}$ |
| لاد (۱۰۸۰) | ۷٫۸۴ | ۰٫۰۴۶ | $۱۰٫۸ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۸۰ \times ۱۰^{-۹}$ | ۲۰۵۰۰۰ | $۳۰ \times ۱۰^{۶}$ |
| لاد (زنگ‌نزن (۱۸Cr-۸N | ۷٫۹۳ | ۰٫۰۱۵ | $۱۶ \times ۱۰^{-۶}$ | $۷۰۰ \times ۱۰^{-۹}$ | ۲۰۵۰۰۰ | $۳۰ \times ۱۰^{۶}$ |
| **امیکها** | | | | | | |
| $Al_2$( | ۳٫۸ | ۰٫۰۲۹ | $۹ \times ۱۰^{-۶}$ | $>۱۰^{۱۲}$ | ۳۵۰۰۰۰ | $۵۰ \times ۱۰^{۶}$ |
| ر | | | | | | |
| ساختمانی | ۲٫۳(±) | ۰٫۰۰۰۶ | $۹ \times ۱۰^{-۶}$ | — | — | — |
| نسوز | ۲٫۱ | ۰٫۰۰۰۸ | $۴٫۵ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱٫۴ \times ۱۰^{۶}$ | — | — |
| گرافیتی | ۱٫۵ | — | $۵ \times ۱۰^{-۶}$ | — | — | — |
| کف‌سازی | ۲٫۵ | — | $۴ \times ۱۰^{-۶}$ | — | — | — |
| سیلیسی | ۱٫۷۵ | ۰٫۰۰۰۸ | — | $۱٫۲ \times ۱۰^{۶}$ | — | — |
| . | ۲٫۴(±) | ۰٫۰۰۱۰ | $۱۳ \times ۱۰^{-۶}$ | — | ۱۴۰۰۰ | $۲ \times ۱۰^{۶}$ |
| ه | | | | | | |
| مسطح | ۲٫۵ | ۰٫۰۰۰۷۵ | $۹ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۰^{۱۲}$ | ۷۰۰۰۰ | $۱۰ \times ۱۰^{۶}$ |
| بوروسیلیکاتی | ۲٫۴ | ۰٫۰۰۱۰ | $۲٫۷ \times ۱۰^{-۶}$ | $>۱۰^{۱۵}$ | ۷۰۰۰۰ | $۱۰ \times ۱۰^{۶}$ |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| سیلیسی | ۲٫۲ | ۰٫۰۰۱۲ | $۰٫۵ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۰^{۱۸}$ | ۷۰۰۰۰ | $۱۰ \times ۱۰^{۶}$ |
| ویکور | ۲٫۲ | ۰٫۰۰۱۲ | $۰٫۶ \times ۱۰^{-۶}$ | — | — | — |
| پشم شیشه | ۰٫۰۵ | ۰٫۰۰۰۲۵ | — | — | — | — |
| گرافیت (توده) | ۱٫۹ | — | $۵ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۰^{-۵}$ | ۷۰۰۰ | $۱ \times ۱۰^{۶}$ |
| Mg | ۳٫۶ | — | $۹ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۰^{۳}(۱۱۰۰°C)$ | ۲۰۵۰۰۰ | $۳۰ \times ۱۰^{۶}$ |
| کوارتز ($SiO_2$) | ۲٫۶۵ | ۰٫۰۱۲ | — | $۱۰^{۱۲}$ | ۳۱۰۰۰۰ | $۴۵ \times ۱۰^{۶}$ |
| Si | ۳٫۱۷ | ۰٫۰۱۲ | $۲٫۵ \times ۱۰^{-۶}$ | $۰٫۰۲۵(۱۱۰۰°C)$ | — | — |
| Ti | ۴٫۵ | ۰٫۰۳۰ | $۷ \times ۱۰^{-۶}$ | $۵۰ \times ۱۰^{-۸}$ | ۳۵۰۰۰۰ | $۵۰ \times ۱۰^{۶}$ |
| **ی‌مرها** | | | | | | |
| ملامین فرم آلدئید | ۱٫۵ | ۰٫۰۰۰۳۰ | $۲۷ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۰^{۱۱}$ | ۹۰۰۰ | $۱٫۳ \times ۱۰^{۶}$ |
| ل-فرم آلدئید | ۱٫۳ | ۰٫۰۰۰۱۶ | $۷۲ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۰^{۱۰}$ | ۳۵۰۰ | $۰٫۵ \times ۱۰^{۶}$ |
| ره-فرم آلدئید | ۱٫۵ | ۰٫۰۰۰۳۰ | $۲۷ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۰^{۱۰}$ | ۱۰۳۰۰ | $۱٫۵ \times ۱۰^{۶}$ |
| ستیکها (مصنوعی) | ۱٫۵ | ۰٫۰۰۰۱۲ | — | — | ۴-۷۵ | ۶۰۰-۱۱۰۰۰ |
| ستیك (وولکانیده) | ۱٫۲ | ۰٫۰۰۰۱۲ | $۸۱ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۰^{۱۲}$ | ۳۵۰۰ | $۰٫۵ \times ۱۰^{۶}$ |
| اتیلن (L.D.) | ۰٫۹۲ | ۰٫۰۰۰۳۴ | $۱۸۰ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۰^{۱۳}-۱۰^{۱۶}$ | ۱۰۰-۳۵۰ | ۱۴۰۰۰-۵۰٫۰۰۰ |
| اتیلن (H.D.) | ۰٫۹۶ | ۰٫۰۰۰۵۴ | $۱۲۰ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۰^{۱۲}-۱۰^{۱۶}$ | ۳۵۰-۱۲۵۰ | ۵۰۰۰۰-۱۸۰۰۰۰ |
| استیرن | ۱٫۰۵ | ۰٫۰۰۰۰۸ | $۶۳ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۰^{۱۶}$ | ۲۸۰۰ | $۰٫۴ \times ۱۰^{۶}$ |
| وینیلیدن کلرید | ۱٫۷ | ۰٫۰۰۰۱۲ | $۱۹۰ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۰^{۱۱}$ | ۳۵۰ | $۰٫۰۵ \times ۱۰^{۶}$ |

## پیوست ج. (ادامه)

| اده | چگالی، $Mg/m^3$ $(=g/cm^3)$ | رسانندگی گرمایی، $\left(\frac{°C}{mm}\right)$ $\left(\frac{\text{وات}}{mm^2}\right)$ | انبساط خطی، $°C^{-1}$ | مقاومت ویژهٔ الکتریکی، اهم-متر | میانگین مدول کشسان، $E$ MPa | Psi |
|---|---|---|---|---|---|---|
| تترافلوئورواتیلن | ۲ر۲ | ۰ر۰۰۰۲۰ | $۱۰۰ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۰^{۱۴}$ | ۳۵۰–۷۰۰ | ۵۰۰۰۰–۱۰۰۰۰۰ |
| متیل‌متااکریلیت | ۱ر۲ | ۰ر۰۰۰۲۰ | $۹۰ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۰^{۱۴}$ | ۳۵۰۰ | $۰ر۵ \times ۱۰^{۶}$ |
| ون | ۱ر۱۵ | ۰ر۰۰۰۲۵ | $۱۰۰ \times ۱۰^{-۶}$ | $۱۰^{۱۲}$ | ۲۸۰۰ | $۰ر۴ \times ۱۰^{۶}$ |

ادههای این جدول از منابع مختلف برداشته شده است.

شق دیگر آن، $(W/mm^2)/(K/mm)$. ضرب‌در ۱۹۲ر۰، $Btu/(Ft^2.s)/(°F/in)$ به‌دست می‌آید.

*یا، $K^{-1}$، با تقسیم کردن بر ۸ر۱، $°F^{-1}$ به‌دست می‌آید.

** اهم متر ضرب‌در ۳۹، اهم-اینچ به‌دست می‌آید.

## پیوست د. فرهنگ اصطلاحات

Abrasive(**سایا**). مادهٔ سخت و از نظر مکانیکی مقاوم که برای سنگزنی و برش به‌کار می‌رود ومعمولا ازمواد سرامیکی ساخته می‌شود.

Absorption (**جذب**). جذب و تحلیل حجمی (به adsorption رجوع کنید).

$A_mB_mX_p$compounds(**ترکیبات** $A_mb_nX_p$). ترکیبات سه‌تایی. دراین کتاب X معمولا اکسیژن است؛ A و B معمولا اتمهای فلزی‌اند.

Acceptor levels (**ترازهای پذیرنده**). ترازهای انرژی حاملهای نوع p (شکاف الکترونی).

Acceptor saturation (**اشباع ترازهای پذیرنده**). ترازهای پذیرندهٔ پرشده در نیمرساناهای نوع $p$. درنتیجهٔ آن، فعالسازی گرمایی تعداد حاملهای خارجی را افزایش نمی‌دهد.

Activation energy (**انرژی فعالسازی**). سد انرژی که قبل از واکنش باید بدان رسید.

Addition polymerization (**پلی‌مرکردن افزایشی**). پلی‌مرکردن بسا افزایش تدریجی مونومرها ...

Additive properties (**خواص افزایشی**). خواص مخلوط که فقط به‌شکل هندسی بستگی دارد (نه برهمکنش فازی).

Adsorption (**جذب سطحی**). چسبندگی سطحی (به absorbtion رجوع کنید).

Age-hardening(**پیرسختی**). (به‌رسوب سختی رجوع کنید)

Agglomerated material (**مواد همجوش**). ذرات ریزی که به‌هم می‌چسبند و تودهٔ متشکلی به‌وجود می‌آورند.

Aggregate (**مصالح دانه‌بندی شده**). کلوخهٔ ذرات درشتی کـه در بتن به‌کار می‌رود مثلا ماسه و شن‌ریزه.

AISI, SAE steels (**فولادهای** AISI، SAE). شاخص استاندارد شناسایی برای فولادهای سادهٔ کربنی و کم‌آلیاژ که بر اساس ترکیب شیمیایی مشخص شده‌اند دو شمارهٔ آخر مقدار کربن را نشان می‌دهد. (جدول ۹ـ۹ـ۱ را ببینید.)

Allotropism (**چندگونی**)، polymorphism را ببینید.

Alloy (**آلیاژ**). فلزی حاوی دو یا چند عنصر.

Alloy retardation (**تأخیر آلیاژی**). کاهش‌میزان تجزیهٔ استنیت به‌سبب وجود عناصر آلیاژی.

Alloing elements (**عناصر آلیاژی**). عناصری که برای تشکیل آلیاژ افزوده می‌شوند(گاهی تحت‌عنوان آلیاژها نامیده می‌شوند).

Alpha iron (**آهن آلفا**). آهن با ساختار مکعبی مرکزدار که در دمای متعارفی پایدار است.

Amorphous(**بی‌شکل**). غیربلورین و بدون نظم پردامنه.

Anion (**آنیون**). یون منفی.

Anisotropic (**ناهمسانگرد**). دارای خواص مختلف درجهات مختلف.

Annealing(**تابکاری**). گرم وسرد کردن برای ایجاد نرمی.

Annealing point (glass) (**نقطهٔ تابکاری (شیشه)**). عملیات گرمایی برای تنشگیری. دما باید ویسکوزیته‌ای برابر تقریباً pa.s $10^{13.5}$ بهوجود آورد.

Anode (آند). الکترودی که برای مدار خارجی الکترون تأمین می‌کند.

Anodized (**آندکاری‌شده**). سطح پوشیده شده از لایهٔ اکسید؛ که با به‌کاربردن این قطعه به‌عنوان آند در حمام الکترولیت حاصل می‌شود.

Arrhenius equation (**رابطهٔ آرنیوس**). رابطهٔ فعالیت گرمایی (توضیح مثال ۴-۶-۲ را ببینید).

Asbestos(**پنبهٔ نسوز**). مادهٔ سیلیکاتی رشته‌ای.

ASTM grain-size number (**عدد اندازهٔ دانهٔ** ASTM). شمارش استاندارد دانه‌ها (معادلهٔ ۴-۴-۲ را ببینید).

Atactic (**بی‌آرایش**). عدم‌وجود تکرار پردامنه در پلیمر (درمقایسه با تک‌آرایش).

Atomic mass unit (amu) (**واحدجرم اتمی (amu)**). یک‌دوازدهم جرم $C^{12}$؛ گرم بر ($10^{24} \times 0.6022$).

Atomic number (**عدد اتمی**). تعداد الکترونهای متعلق به‌اتم بدون بار.

Atomic packing factor (**ضریب فشردگی اتمی**). کسری از حجم که توسط اتمهای (یا یونهای) «کروی» اشغال شده است.

Atomic radius (elements)(**شعاع اتمی (عناصر)**). نصف فاصلهٔ بین‌اتمی.

Atomic weight (**وزن اتمی**). جرم اتم برحسب واحدهای جرم اتمی.

Austempering (**بازپخت استنیتی**). فرایند تبدیل همدما برای تشکیل بینیت.

Austenite ($\gamma$) (**استنیت ($\gamma$)**). آهن مکعبی با وجوه مرکزپر، یا آلیاژ آهن با همین ساختار.

Austenite decomposition (**تجزیهٔ استنیتی**). واکنش اوتکتوییدی که استنیت را به ($\alpha$ + کاربید) تبدیل می‌کند.

Austenite grain size (**اندازهٔ دانهٔ استنیت**). اندازهٔدانهٔ ASTM را ببینید.

Austenization (**استنیتی‌کردن**). عملیات گرمایی برای حل کربن در آهن fcc، و بدین‌وسیله تشکیل استنیت.

Avogadro's number($N$) (**عددآووگادرو ($N$)**). تعداد amu درهر گرم؛ بنابراین تعداد مولکولها در هرمول.

AX compounds(**ترکیبات AX**). ترکیبات دوتایی با نسبت یک‌به‌یک دوعنصر؛ معمولاً یونی.

AX structure (CsCl) (ساختار AX (CsCl)). ساختار ترکیب دوتایی با CN=۸.

AX structure (NaCl) (ساختار AX (NaCl)). ساختار ترکیب دوتایی با CN=۶.

AX structure (ZnS) (ساختار AX (ZnS)). ساختار ترکیب دوتایی با CN=۴.

$A_mX_p$ structure (ساختار $A_mX_p$). ترکیب‌دوتایی با نسبت اجزای نامساوی، (بخش ۸–۳ را ببینید).

Axis (crystals) (محور (بلورها)). یکی از سه‌جهات اصلی بلور.

Bainite (بینیت). میکروساختار کاربید پخش شده درفریت، که با تبدیل همدما در دمای پایین به‌دست می‌آید.

Base (بیس (پایه)). ناحیهٔ مرکزی ترانزیستور.

Bifunctional (دوعاملی). مولکول با دو محل واکنش برای اتصال مولکولهای مجاور.

Body-centered cubic (bcc) (مکعب مرکزپر (bcc)). سلول واحدی که وضعیت مرکز آن مشابه وضعیت گوشه‌هاست.

Bohr magneton (β) (مگنتون بوهر). گشتاور مغناطیسی الکترونهای مجزا ($9{,}2700 \times 10^{-24}$ amp · m²).

Boltzmann's constant (k) (ثابت بولتسمان). ضریب انرژی گرمایی ($13{,}8000 \times 20^{24}$ J/K).

Bond angle (زاویهٔ پیوند). زاویهٔ بین پیوندهای فضا ویژه در مولکولها، یا جامدات کووالانس.

Bond energy (انرژی پیوند). انرژی لازم برای جداکردن دو اتمی که پیوند شیمیایی دارند. معمولا به‌صورت انرژی برمول $10^{24} \times 6{,}0$ پیوند نوشته می‌شود.

Bond length (طول پیوند). فاصلهٔ بین اتمی پیوند فضا ویژه.

Boundary (microstructures) (مرز (میکروساختار)). سطح بین‌دو دانه یا بین دو فاز.

Bragg's law (قانون براگ). قانون تفرق برای ساختارهای تناوبی (معادلهٔ ۳–۸–۲).

Branching (شاخه‌دار شدن). دوشاخه شدن در پلی‌مرکردن افزایشی.

Brass (برنج). آلیاژ مس و روی.

Bravais lattices (شبکهٔ براوه). ۱۴ شبکهٔ بلوری اصلی.

Brazing (لحیمکاری سخت). متصل‌کردن فلزات در دمای بالای ۴۲۵°C (۸۰۰°F) ولی زیرنقطهٔ ذوب فلزات متصل شونده.

Bridging oxygens (اکسیژنهای پلساز). اتمهای اکسیژن که بین دو چهار وجهی سیلیس به اشتراك گذاشته می شوند.

Brinell (برینل). آزمایش سختی با استفاده از ساچمهٔ کروی. سختی توسط قطر تورفتگی معین می شود.

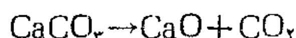
Brittle (ترد). برعکس چقرمه؛ با جذب انرژی کمی می شکند.

Bronze (مفرغ). آلیاژ مس و قلع (مگر اینکه طور دیگری مشخص شود، مثلا مفرغ آلومینیمی آلیاژی از مس و آلومینیم است).

Burger's vector (b) (بردار برگر (b)). بردار تغییر مکان در اطراف نابجایی. بردار لغزشی را ببینید.

Butadiene-type compound (ترکیب نوع بوتادین). شکل اولیهٔ چندین لاستیك براساس $C=C-C=C$ (جدول ۷-۲-۲ را ببینید.)

Calcination (تکلیس). تجزیهٔ جامد به گاز و جامد دیگر؛ مثلا



$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

Carbide ($\bar{C}$) (کاربید ($\bar{C}$)). ترکیب فلز و کربن. این نام به کاربیدهایی که فلز اصلی آنها آهن است گفته می شود مگر آنکه به طور ویژه مشخص شده باشند.

Carbon steel (فولاد کربنی). فولادی که در آن کربن عنصر آلیاژی متغیر اصلی است. (سایر عناصر آلیاژی فقط به مقادیر جزئی موجودند).

Carburize (کربن دهی). وارد کردن کربن از سطح فولاد توسط نفوذ، برای تغییر خواص سطح.

Case (پوستهٔ بیرونی). ناحیهٔ زیر سطح (معمولا فولاد کربن داده شده).

Case-hardening (برون سخت سازی). سخت کردن با ایجاد پوسته ای با کربن بیشتر.

Cast iron (چدن). آلیاژ Fe-C حاوی به حد کافی کربن، برای ایجاد مایع اوتکتیك درحین انجماد. درعمل معمولا به معنی آن است که کربن بیشتر از آنکه بتواند در استنیت حل شود (۲٪<) وجود داشته باشد. همچنین به چدن خاکستری، چکش خوار و سفید رجوع کنید.

Casting (ریخته گری). فرایند ریختن مایع یا مواد معلق درقالب، آنچه که از این فرایند به دست می آید قطعهٔ ریختگی نامیده می شود.

Catalyst (کاتالیزور). افزودنی قابل استفادهٔ مجدد برای فعالسازی واکنش شیمیایی.

Cathode (کاتد). الکترودی که ازمدار خارجی الکترون دریافت می کند.

Cathode reactions (واکنشهای کاتدی). واکنشهای احیا (مصرف الکترون) در الکترود گالوانی.

Cation (کاتیون). یون مثبت.

C-Curve (منحنی C). منحنی تبدیل همدما.

Cell (galvanic) **(سلول (گالوانی))**. اجتماع دو الکترود در یك الکترولیت.
Cell, composition **(سلول ترکیب)**. سلول گالوانی بین الکترودهایی با ترکیبات مختلف.
Cell, concentration **(سلول غلظتی)**. سلول گالوانی حاصل از غلظتهای نامساوی الکترولیت (محلول رقیقتر آند را ایجاد می‌کند).
Cell, oxidation **(سلول اکسایشی)**. سلول گالوانی حاصل از پتانسیلهای نامساوی اکسیژن (ناحیهٔ کم‌اکسیژن آند را به‌وجود می‌آورد.)
Cell, stress **(سلول تنشی)**. سلول گالوانی حاصل از آندی که به‌طور پلاستیکی تغییرشکل یافته است.
Cell, unit **(سلول واحد)**. به unitcell رجوع کنید.
Cellulose **(سلولز)**. پلی‌مر طبیعی $C_6H_{10}O_5$ (به‌معادلهٔ ۱۳-۳-۱ رجوع کنید.)
Cement **(سیمان)**. ماده‌ای (معمولا سرامیکی) برای چسباندن جامدات به‌یکدیگر.
Cement hydraulic **(سیمان آبدار)**. سیمانی که توسط واکنش با آب پیوند برقرار می‌کند.
Cement, portland **(سیمان پرتلند)**. سیمان سیلیکات کلسیم آبدار.
Cementite **(سمانتیت)**. آهن‌کاربید ($Fe_3C$).
Center of gravity method **(روش گرانیگاه)**. روش محاسبات تعیین فازها ترکیب کلی در گرانیگاه اجزای وزنی قرار دارد.
Ceramics **(سرامیکها)**. موادی حاوی ترکیبات عناصر فلزی و غیرفلزی.
Charge carrier **(حامل بار الکتریکی)**. الکترونها در نوار رسانشی حامل نوع $n$ (منفی) را تأمین می‌کنند. شکافهای الکترونی در نوار ظرفیتی حامل نوع $p$ (مثبت) را به‌وجود می‌آورند.
Charge density ($\mathscr{D}$) **(چگالی بار)**. کولن بر واحد سطح.
Charpy **(شارپی)**. یکی از دو آزمایش استاندارد ضربه، با استفاده از میلهٔ چهارگوش شکاف‌دار.
Cis (polymers) **((پلی‌مرهای) سیس)**. پیشوندی که مکانهای اشباع نشده در یك طرف زنجیر پلی‌مر را نشان می‌دهد.
Clay **(رس)**. ذرات ریز جامد ($<0.1mm$). در سرامیکها، رسها به طور ویژه، آلومینو سیلیکاتهایی صفحه‌ای شکل‌اند.
Cleavage **(رخ‌برگی)**. صفحه‌ای که در امتداد آن جسم به‌آسانی به‌دونیم می‌شود.
Coalescence **(تجمع)**. تغییر از ذرات ریز بسیار زیاد به‌ذرات درشت کمتر.
Coercive force (electric, $\mathscr{E}_c$) **(نیروی پسماندزا (الکتریکی))**. میدان الکتریکی لازم برای از بین بردن قطبیت باقیمانده.
Coercive force (magnetic, $H_c$) **(نیروی پسماندزا (مغناطیسی))**. میدان

مغناطیسی لازم برای از بین بردن خواص مغناطیسی باقیمانده.

Cold work, % (**درصد کار سرد**). کرنش پلاستیکی محاسبه شده از تغییر سطح مقطع، $100(A_o-A_f)/A_o$.

Cold working (**کارسرد، سردکاری**). تغییرشکل زیر دمای تبلور مجدد.

Collector (**کلکتور (گردآور)**). قسمتی از ترانزیستور که حاملهای بار را از گسیلنده (امیتر) از طریق بیس دریافت می‌کند.

Compact (**مادهٔ فشرده**). شکل فشرده شدهٔ گرد قبل از تفجوشی.

Component (design) (**طراحی قطعه**). طراحی و مهندسی قطعات مختلف ماشین یا مشابه آن.

Component (phases) (**جزء (فازها)**). مواد شیمیایی اصلی لازم برای به‌وجود آوردن مخلوط یا محلول شیمیایی.

Composite (**مواد چندسازه**). ماده‌ای حاوی دو یا چند مادهٔ مختلف.

Compound (**ترکیب**). فازی متشکل از دو یا چندعنصر به‌نسبت معین.

Concrete (**بتن**). مادهٔ دانه‌بندی شده‌ای از سنگریزه و سیمان آبی.

Conduction band (**باند رسانش**). باندانرژی الکترونهای رسانشی. الکترونها برای آنکه حامل باشند باید در این نوار قرار گیرند.

Conduction electron (**الکترون رسانشی**). الکترونی که از شکاف انرژی صعود می‌کند تا به‌عنوان حامل بارمنفی عمل کند.

Conductivity (**رسانندگی**). انتقال انرژی گرمایی یا الکتریکی درطول شیب پتانسیل.

Configuration (**پیکربندی**). ترتیب قرارگرفتن مرها درطول زنجیر پلی‌مر (عوض شدن این ترتیب مستلزم شکسته‌شدن پیوند است).

Conformation (**صورت‌بندی**). چرخش یا پیچ‌دار شدن زنجیر پلی‌مر (تغییر آن فقط مستلزم چرخش پیوند است).

Continuous cooling transformation (**دگرگونی با سردکردن مداوم**). واکنش حرارتی درحین سردکردن، به ویژه تجزیهٔ استنیت.

Cooling rate (**سرعت سردکردن**). کاهش دما درثانیه؛ به ویژه سرعت تغییر دمای دگرگونی.

Coordination number (CN) (**عدد کوئوردیناسیون (CN)**). تعداد نزدیکترین یونها یا اتمهای همسایه.

Copolymer (**کوپلی‌مر**). پلی‌مرهایی با بیش از یک نوع مر.

Core (heat treatiny) (**عملیات گرمایی**). مغزه مرکزمیله، درون پوسته.

Corrosion (**خوردگی**). فاسدشدن و ازبین رفتن توسط تهاجم شیمیایی.

Coulombic forces (**نیروی کولنی**). نیروی بین ذرات باردار، به‌ویژه یونها.

Covalent bond (**پیوندکووالانسی**). پیوند بین اتمی که از اشتراك يك جفت الکترون در دواتم مجاور به‌وجود می‌آید.

Creep (**خزش**). تغییرشکل آهسته بـا تنشهایی کمتر از استحکام تسلیم معمولی (معمولا در دماهای بالا اتفاق می‌افتد).

Creep rate (**سرعت خزش**). کرنش خزش در واحد زمان.

Critical cooling rates (austenite decomposition) (**سرعت بحرانی سردکردن (تجزیهٔ استنیت)**) $CR_M$. آهسته‌ترین سرعت سرد کردنی است که فقط مارتنزیت تولید می‌کند. $CR_P$ سریعترین سرعت سرد کردنی است که پرلیت تولید می‌کند.

Critical shear stress (**تنش برشی بحرانی**). حـداقـل تنش تفکیك شده برای ایجاد برش.

Cross linking (**اتصال متقاطع**). به‌هم‌بستن دوزنجیر پلی‌مرمجاور.

Crystal (**بلور**). جامد از نظر فیزیکی یکنواخت، درسه‌بعد، با نظم پردامنه.

Crystal direction (*uvw*) (**جهت بلوری (*uvw*)**). شعاعی از يك مبدأ اختیاری که ازمکان انتخاب شدهٔ سلول واحد می‌گذرد. شاخصها، ضرایب شبکه آن مکان است.

Crystal lattice (**شبکهٔ بلوری**). ترتیب فضایی مکانهای معادل در بلور.

Crystal plane (**صفحهٔ بلوری**). ترتیب دو بعدی اتمها (به miller indices رجوع کنید.)

Crystal system (**سیستم بلوری**). ویژگیهای سلولهای واحد با تقارن محوری و ابعادی (جدول ۳ــ۱ــ۱).

Crystallinity (polymers) (**بلورینگی (پلی‌مرها)**). جزء حجمی جامدی که ساختار بلورین دارد. (در مقایسه باساختار بی‌شکل.)

Curie point (magnetic) (**نقطهٔ کوری (مغناطیسی)**). دمای انتقال بیـن فرومغناطیس و پارامغناطیس.

Current ($I$) (**شدت جریان $I$**). جریان بار مثبت (برعکس جهت حرکت الکترون).

Current density ($i$) (**چگالی‌شدت جریان**). آمپر بر واحد سطح.

Damping capacity (**ظرفیت لرزه‌میرایی**). تقلیل ارتعاشات مکانیکی.

Defect structure (**ساختار معیوب**). ترکیباتی که نسبتهای اتمها یا یونهای آنها عدد صحیح نباشد. این ترکیبات در ساختار خودجاهای خالی یا اتمهای بین‌نشین دارند.

Deformation, elastic (**تغییرشکل کشسان**). تغییرشکل قابل برگشت بدون تغییرمکان دائمی اتمی (یا مولکولی).

Deformation, plastic (**تغییرشکل پلاستیکی**). تغییرشکل دائمی حاصل از تغییرمکان اتمها (یا مولکولها) به‌محیط جدید.

Deformation crystallization (**تبلور و تغییرشکل**). تبلور حـاصل از جداشدن پلی‌مرها و ایجاد ترتیب خطی موازی.

Degradation **(ازهم پاشیدگی)**. ازهم پاشیدگی پلی‌مرها وایجاد مولکولهای کوچکتر.

Degree of polymerization ($n$)**(درجهٔ پلی‌مر شدن)**. مر بروزن‌مولکولی متوسط.

Delocalization **(عدم استقرار)**. اربیتالهای چنداتمی.

Density, apparent **(چگالی ظاهری)**. جرم تقسیم‌برحجم ظاهری (ماده+ منافذ بسته).

Density, bulk **(چگالی انباشتی)**. جرم تقسیم برکل حجم.

Density, true **(چگالی حقیقی)**. جرم‌تقسیم برحجم واقعی (بدون‌جای‌خالی).

Dielectric **(دی‌الکتریك)**. عایق،ماده‌ای که می‌تواند بین دوالکترود قرار گیرد بدون‌آنکه رسانایی ایجاد کند.

Dielectric constant, relative($\kappa$) **(ثابت‌نسبی دی‌الکتریك ($\kappa$))**. نسبت چگالی بار حاصل ازمیدان الکتریکی (۱) با و (۲) بدون وجود ماده.

Dielectric strength **(استحکام دی‌الکتریك)**. پتانسیل شکست الکتریکی عایق برواحد ضخامت.

Diffraction (X-ray) **(تفرق (اشعهٔ ایکس))**. تفرق اشعهٔ ایکس‌توسط‌اتمهایی با فواصل منظم.

Diffusion **(نفوذ)**. حرکت اتمها یا مولکولها در ماده.

Diffusivity ($D$) **(نفوذپذیری ($D$))**. شار نفوذ بر واحد شیب غلظت.

Dipole**(دوقطبی)**.جفت الکتریکی با دوسر منفی ومثبت.

Dipole moment **(گشتاور دوقطبی)**. حاصل‌ضرب‌بارالکتریکی‌درفاصلهٔ بار.

Directional solidification**(انجماد جهتدار)**. خارج‌کردن گرما از یك سرقالب برای ایجاد انجماد.

Dislocation, edge ($\perp$) **(نابجایی لبه‌ای ($\perp$))**. نقص خطی‌در لبهٔ صفحهٔ بلوری اضافی. بردار لغزش عمود برخط نقص است.

Dislocation, screw ($S$)**(نابجایی پیچی)**. نقص‌خطی با بردار لغزش‌موازی با خطی نقص.

Dispersed phases **(فازهای پراکنده)**. میکروساختار ذرات بسیار ریز در فاز زمینه.

Domains**(حوزه‌ها)**.ناحیهٔ میکروساختاری با نظم مغناطیسی هماهنگ (یا نظم دوقطبی الکتریکی).

Donor exhustion **(تخلیهٔ ترازهای دهنده)**. تخلیهٔ الکترونهای‌دهنده. به‌همین علت فعالسازی حرارتی بیشتر، تعداد حمل‌کننده‌های خارجی را افزایش نمی‌دهد.

Donor levels **(ترازهای دهنده)**. سطح‌انرژی‌حمل‌کنندهٔ نوع $n$ (الکترون).

Drawing (**کشیدن**). شکل‌دادن‌مکانیکی توسط کشش ازمیان یك قالب. مثل کشش سیم (شکل ۶ـ۲ـ۳) و کشش‌ورق؛ معمولا در دمایی زیر دمای‌تبلور مجدداً انجام می‌شود.

Drawing (glass) (**کشیدن (شیشه)**). شکل‌دادن باکشیدن‌شیشهٔ‌ویسکوز ازمیان شیپوره و تولید ورق میله یا رشته.

Drift velocity ($v$)(**سرعت رانش**). برآیندسرعت‌الکترون درمیدان‌الکتریکی.

Ductile fracture (**شکست انعطاف‌پذیر**). شکستی‌که با تغییر شکل پلاستیکی و درنتیجه باجذب انرژی همراه باشد.

Ductility(**انعطاف‌پذیری**). تغییرشکل دائمی قبل از شکست؛ که توسط ازدیاد طول یا کاهش سطح مقطع اندازه‌گیری می‌شود.

Elastic strain (**کرنش‌کشسان**). تغییرشکل غیردائمی.

Elastomer (**الاستومر**). پلی‌مر باکرنش‌کشسان زیاد. این‌کرنش ازقطع زنجیر پلی‌مَر ناشی می‌شود.

Electric field ($\mathcal{E}$) (**میدان الکتریکی**). گرادیان ولتاژ، ولت برسانتی‌متر.

Electrical conductivity ($\sigma$) (**رسانندگی الکتریکی ($\sigma$)**). ضریب بین شار بار و میدان الکتریکی. عکس مقاومت الکتریکی.

Eectrical resistivity ($\rho$) (**مقاومت ویژهٔ الکتریکی($\rho$)**).مقاومت‌ماده‌ای به‌ابعاد واحد. برعکس رسانندگی الکتریکی.

Electrode potential ($\phi$) (**پتانسیل‌الکترود ($\phi$)**). ولتاژ به‌وجـود آمـده در الکترود (درمقایسه با الکترود مرجع استاندارد).

Electrolyte(**الکترولیت**). محلول یونی‌رسانا (مایع یا جامد).

Electron charge ($q$) (**بار الکترون ($q$)**). بار $0.16 \times 10^{-18}$ کولن (یا $0.16 \times 10^{-18}$ آمپر . ثانیه) که توسط هرالکترون حمل می‌شود.

Electron hole ($p$) (**حفرهٔ الکترونی($p$)**).جای‌خالی‌الکترون درنوارظرفیتی که به‌عنوان حامل‌بار مثبت عمل می‌کند.

Electron-hole pair (**جفت حفره و الکترون**). الکترون رسانشی در باند رسانشی و شکاف الکترونی همراه در نوار ظرفیتی، کـه وقتی در نیمه رساناهـای ذاتی الکترونی از شکاف می‌پرد حاصل می‌شود.

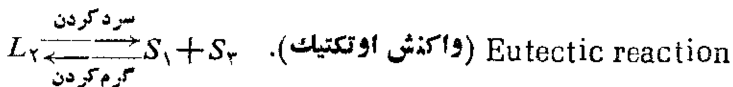
Electronegativity (**الکترو نگاتیوی**). مقدارجاذبهٔ الکترون‌برای‌ویژگیهای غیرفلزی.

Electron repulsion (**دافعهٔ الکترون**). نیروی‌دافعهٔ الکترونهای بسیار زیاد در همان حومه. نیروی جاذبهٔ پیوند را خنثی می کند.

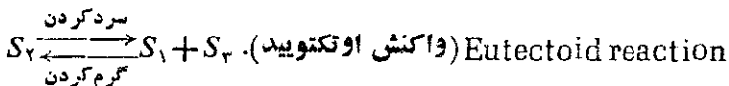
Electroplating(**آبکاری الکتریکی**). فرایند کاتدی احیا، عکس خـوردگی. الکترونها توسط مدار خارجی تأمین می‌شوند.

Elongation (**ازدیاد طول**).کرنش محوری‌همراه باشکست (سنجهٔ طولی باید معین شود.)

End-quench test (**آزمایش آب‌دادن انتها**). آزمایش استاندارد توسط آب‌دادن از یك سر، برای تعیین سختی‌پذیری.
Endurance limit(**حد دوام**). حداکثر تنش مجاز برای چرخه پیمایی نامحدود.
Energy band(**باند انرژی**). سطوح مجاز انرژی برای الکترونهای ظرفیتی.
Energy distribution (**توزیع انرژی**). طیف سطوح انرژی که توسط فعالسازی گرمایی مشخص می‌شود.
Energy gap ($E_g$)(**شکاف انرژی** ($E_g$)). انرژیهای اشغال‌نشده بین نوار ظرفیتی و نوار رسانش.
Energy well (**چاه‌انرژی**). حداقل انرژی پتانسیل بین اتمی.
Entrained air(**هوایی که به‌همراه مواد هواده وارد بتن می‌شود**). حبابهای (تقریباً ۱ میلی‌متری) هوا که به‌بتن اضافه می‌شود تا کارپذیری را بیشتر کند و صدمات ناشی از یخبندان را کمتر کند.
Equiaxial (**هم‌محور**). ابعاد قابل‌مقایسه درسه‌جهت اصلی.
Equicohesive temperature (**دمای همدوسمندی**). دمایی که در آن استحکام دانه‌ها و مرزدانه‌ها مساوی است.
Equilibrium (chemical) (**تعادل**). توقف واکنش (زیرا انرژی آزاد به‌حداقل رسیده است).
Equilibrium diagram (**نمودار تعادلی**). رجوع کنید به‌نمودار فازی.
Equivalent sites (**مکانهای معادل**). مکانهایی درشبکهٔ بلوری که محیط کاملا یکسانی دارند.
Eutectic analysis (composition)(**تجزیهٔ اوتکتیك (ترکیب)**). آنالیز فاز محلول مایع باحداقل دمای ذوب (در محل تقاطع دومنحنی حلالیت).


Eutectic reaction (**واکنش اوتکتیك**). $L_2 \underset{\text{گرم کردن}}{\overset{\text{سرد کردن}}{\rightleftharpoons}} S_1 + S_2$

Eutectic temperature (**دمای اوتکتیك**). دمای واکنش اوتکتیك درمحل تقاطع دومنحنی حلالیت.
Eutectoid analysis (composition) (**تجزیهٔ اوتکتوید (ترکیب)**). آنالیز فاز محلول جامد. باحداقل دمای تجزیه (درمحل تقاطع دومنحنی حلالیت جامد).
Eutectoid ferrite (**فریت اوتکتویید**). رجوع کنید به Ferrite, eutectoid.


Eutectoid reaction(**واکنش اوتکتویید**). $S_2 \underset{\text{گرم کردن}}{\overset{\text{سرد کردن}}{\rightleftharpoons}} S_1 + S_2$

Eutectoid shfit (**تغییرمکان اوتکتویید**). تغییر دما و آنالیز کربن واکنش اوتکتویید، حاصل از افزایش عناصر آلیاژی.

Eutectoid temperature (**دمای اوتکتویید**). دمای واکنش اوتکتوییددرمحل تقاطع دومنحنی حلالیت جامد.

Expansion coefficient (**ضریب انبساط**). رجوع کنید به thermal-expansion.

Extrinsic semiconductors (**نیمرساناهای خارجی**). رجوع کنید به Semiconductors.

Extrusion (**فشارکاری**). شکل‌دادن بافشاردادن ماده در میان یك قالب (شکل ۶-۲-۲).

Face-centered cubic (fcc) (**مکعب باوجوه مرکز پر**(fcc)). سلول واحدی که موقعیت، وجوه آن مشابه باموقعیت گوشه‌هاست.

Family of directions $\langle uvw \rangle$ (**جهات هم‌خانواده**$\langle uvw \rangle$) جهات بلوری که بجز در مورد انتخاب اختیاری محورها یکسان‌اند.

Family of planes $\{hkl\}$ (**صفحات هم‌خانواده** $\{hkl\}$). صفحات بلوری که بجز درمورد انتخاب اختیاری محورها یکسان‌اند.

Faraday ($\mathcal{F}$) (**فاراده**). بار واحدبرای $۶٫۰ \times ۱۰^{۲۴}$ الکترون(۹۶۵۰۰ کولن)

Fatigue (**خستگی**). تمایل به‌شکست تحت تنشهای چرخه‌ای.

Ferrite (ceramics) (**(سرامیکهای) فریت**). ترکیبات حاوی آهن سه‌ظرفیتی، معمولا مغناطیسی.

Ferrite (metals, α) (**فریت (فلز، α) آهن مکعبی مرکزپر**). یا آلیاژ آهنی باهمین ساختار.

Ferrite, eutectoid (**فریت اوتکتویید**). فریتی که (همراه با کاربید) درحین تجزیهٔ استنیت تشکیل می‌شود.

Ferrite, proeutectoid (**فریت پرواوتکتویید**). فریتی که در دمای بالای اوتکتویید از استنیت جدا می‌شود.

Ferroelectric (**فروالکتریك**). موادی که خودبه‌خود توسط خاصیت دوقطبی بودن مرتب می‌شوند.

Ferromagnetic (**فرومغناطیسی**). موادی که خودبه‌خود توسط خاصیت مغناطیسی بودن مرتب می‌شوند.

Fiber-reinforced plastics(FRP) (**پلاستیکهای تقویت‌شده با رشته‌ها (FRP)**). مادهٔ چندسازهٔ پشم‌شیشه و پلاستیکها.

Fick's first law (**قانون اول فیك**). رابطهٔ بین شارنفوذ و گرادیان غلظت.

Firing (**پختن**). رجوع کنید به sintering.

Flame-hardening (**شعله سختی**). سخت‌کردن با استفاده ازگرمایش سطحی توسط شعله (به‌دنبال آن آب‌دادن).

Fluidity $(f)$ (**سیالیت**). ضریب قابلیت جریان یافتن؛ عکس ویسکوزیته.

Fluorescence (**فلوئورسانی**). که بلافاصله پس از تهییج اتفاق می‌افتد.

Flux (diffusion, $J$) (**شار (نفوذ، $J$)**). انتقال بر واحد سطح و زمان.

Forging (**پتک‌کاری**). شکل‌دادن مکانیکی با فشار (شکل ۶ـ۲ـ۲).

Form $\{hkl\}$ (**شکل $\{hkl\}$**). صفحات بلوری که بجز در انتخاب اختیاری ما در مورد محورها یکسان‌اند.

Fracture, brittle (**شکست ترد**). شکست با پیشروی ترك و بدون انعطاف‌پذیری قابل توجه.

Fracture, ductile (**شکست انعطاف‌پذیر**). شکست با پیشروی ترك به همراه تغییر شکل پلاستیکی.

Frenkel defect (**نقص فرنکل**). تغییرمکان اتم یا یون (حاصل از تهیجای و اتم بین‌نشین).

Functionality (**عاملیت**). تعدادمکانهای در دسترس برای واکنش در پلیمر شدن.

Fusion (heat of) (**گداز (گرمایی)**). انرژی گرمایی لازم برای ذوب جامد بلورین.

Gage length (**سنجه‌طول**). ابعاد اولیه برای تعیین ازدیاد طول (رجوع کنید به شکل ۱ـ۲ـ۲).

Galvanic cell (**سلول گالوانی**). سلولی شامل دو فلز غیرمشابه و یك الکترولیت.

Galvanic protection (**حفاظت گالوانی**). حفاظتی که از فلز به‌وسیلهٔ قرار دادن آن به‌صورت کاتد درمقابل آند قربانی انجام می‌شود.

Galvanization (**روبینه‌کاری**). فرایند پوشش‌دادن به‌فولاد توسط روی برای حفاظت گالوانی.

Gamma iron $(\gamma)$ (**آهن گاما $(\gamma)$**). رجوع کنید به Austenite.

Glass (**شیشه**). جامد بی‌شکل زیر دمای تبدیل شیشه نظم بردامنهٔ بلوری را ندارد ولی معمولا ترتیبی کم دامنه دارد.

Glass transition temperature $(T_g)$ (**دمای انتقال شیشه $(T_g)$**). دمای تبدیل بین مایع فوق تبرید و جامد شیشه‌ای آن.

Grading (**درجه‌بندی**). تقسیم مجموعه برحسب اندازه.

Grain (metals and ceramics) (**دانه (فلزات و سرامیکها)**). بلورهای جداگانهٔ میکروساختار.

Grain (wood) (**دانه (چوب)**). درشت ساختار ناشی از چرخهٔ رشد.

Grain boundary (**مرزدانه‌ها**). ناحیهٔ به‌هم‌خوردن نظم بلورین بین دو دانهٔ مجاور.

Grain boundary area $(S_V)$ (**سطح مرزدانه‌ها $(S_V)$**). سطح در واحد حجم؛ مثلا $mm^2/mm^3$ یا $in^2/in^3$.

Grain growth(**رشد دانه‌ها**). افزایش اندازهٔ متوسط دانه با نفوذ اتمی از میان مرز دانه‌ها (یا فازها).

Grain size(**اندازهٔ دانه**). قطر آماری دانه در یك سطح مقطع تصادفی (اندازهٔ دانه‌های استنیت به‌صورت تعداد دانه‌های استنیت اولیه در سطح استاندارد بیان می‌شود. رجوع کنید به‌بخش ۴ــ۴).

Graphitization (**گرافیتی کردن**). تجزیهٔ آهن‌کاربید به‌آهن و کربن (فرمول ۱۱ــ۱ــ۱).

Hard-drawn(**کشش‌سخت**). کار سرد برای به‌دست آوردن سختی بالا توسط کشیدن.

Hardenability(**سختی‌پذیری**). قابلیت به‌وجود آوردن سختی حداکثر با اجتناب از واکنش ($\gamma \rightarrow \alpha +$ کاربید).

Hardenability curve (**منحنی سختی‌پذیری**). منحنی نمایش سختی میلهٔ آزمایش آب دادن انتهایی.

Hardness (**سختی**). مقاومت درمقابل نفوذ.

Hardness traverse(**سختی عرضی**). منحنی مقادیر سختی.

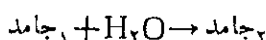
Heat capacity ($c$) (**ظرفیت گرمایی ($c$)**). انرژی بر واحد دما، $dH/dT$.

Hexagonal close-packed(hcp) (**منشور شش برفشرده hcp**). شبکهٔ بلور شش‌وجهی با اتمهای شبکه در رئوس و درمکانهای مشابه درنیمهٔ ارتفاع (به‌شکل ۳ــ۳ــ۲ رجوع کنید.)

High-speed steels(**فولاد تندبر**). فولادهایی که با افزودن عناصر آلیاژی، کاربید آنها درمقابل دمای زیاد پایدار شده است.

Hot-working (**کارگرم، گرمکاری**). تغییرشکلی که بالای دمای تبلور مجدد انجام شود، به‌طوری که درجریان تغییرشکل بازپخت نیز اتفاق افتد.

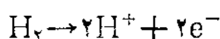
Hydration(**آبدارکردن**). واکنش شیمیایی با استفاده از آب:



$$\text{جامد}_1 + H_2O \rightarrow \text{جامد}_2$$

Hydrogen bridge(**پل‌هیدروژنی**). پیوند واندروالزی که درآن اتم‌هیدروژن (پروتون) جذب الکترونهای اتمهای همسایه شود.

Hydrogen electrode ( **الکترودهیدروژن**). الکترود مرجع استاندارد با واکنش‌ـنیم سلولی



$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$

Hydroplastic (**هیدروپلاستیکی**). خاصیت پلاستیکی درهنگام خیس بودن مثل رسها.

Hypoeutectoid (**هیپواوتکتویید**). به hypeutectoid steels رجوع کنید.

Impact strenght (**استحکام ضربه‌ای**). به toughness رجوع کنید.

Impressed voltage (**ولتاژ مؤثر**).ولتاژ Dc که برای کاتدی کردن فلز درحین کار استفاده می‌شود.

Induced dipole(**دوقطبی القایی**).دوقطبی الکتریکی که توسط میدان الکتریکی خارجی به‌وجود می‌آید.

Induction hardening (**سخت‌کردن القایی**). سخت‌کردن باجریان القایی پربسامد برای گرمایش سطحی.

Ingot(**شمش**). قطعهٔ ریختگی بزرگی که متعاقباً نورد یا پتک‌کاری می‌شود.

Inhibitor (**بازدارنده**). مادهٔ افزودنی به‌الکترولیت که اثر ناپذیرسازی‌را بهتر می‌کند.

Injection molding (**قالبگیری تزریقی**).فرایند قالبگیری‌ماده درقالب بسته. برای‌گرمانرمها قالب نسبتاً سرداست. برای گرما سختهاقالب در دمای کوری‌آن پلاستیک نگه داشته می‌شود.

Insulator (**عایق**). غیررسانای(الف)الکتریکی‌یا (ب) انرژی‌گرمایی؛ درهردو صورت عایق مقاومت ویژهٔ الکتریکی قابل‌توجهی ندارد. ماده‌ای بـا بانـد ظرفیتی پر و شکاف انرژی زیاد.

Interactive properties (**خواص متقابل**).خواص حاصل‌ازرفتارمتقابل دو یا چند فاز.

Intermetallic phose (**فازبین فلزی** ). ترکیب دوفلز.

Internal structure (**ساختار داخلی**). تـرتیب اتمها، مـولکولها،بلورها و دانه‌های درون ماده.

Interplanar spacing (**فضای بین صفحات**).فاصلهٔ‌عمودی بین‌دوصفحهٔ‌بلوری مجاور باشاخص مشابه.

Interrupted quench (**آب‌دادن منقطع**). آب‌دادن دومرحله‌ای‌فولاد شامل گرمایش برای تشکیل استنیت و آب‌دادن اولیه تـا دمایی بالاتر از دمـای شروع تشکیل مارتنزیت و به‌دنبال آن سردکردن ثانویه تا دمای اتاق.

Interstice (**فضای بین‌نشینی**). فضای اشغال نشدهٔ بین اتمها یایونها.

Interstitial site ($n$-fold) (**مکانهای بین‌نشینی ($n$گانه)**). فضاهـای خالی بین $n$ (۶،۴ یا ۸) همسایهٔ اتمی (یا یونی) نزدیک به‌هم.

Ion (**یون**).اتمی‌که‌بار داردزیرا الکترونی به‌آن‌افزوده‌شده یاازآن گرفته‌شده‌است.

Ion stuffing (**چپاندن یون**). تعویض یونی که نیروهای فشاری ایجاد می‌کند زیرا یونهای جدید از مکان متعلق به‌یونهای اولیه بزرگترند.

Ion vacancy (**تهیجای یون**). محل اشغال نشدهٔ یون درساختار بلوری. بار یون غایب باید به‌همان نسبت جبران شود.

Ionic bond(**پیوند یونی**). پیوند اتمی با جاذبهٔ کولنی یونهای غیرمشابه.

Ionic radius(**شعاع یونی**). شعاع تعیین شدهٔ نیمه اختیاری برای یونها، که با عدد همسایگی تغییر می‌کند [رجوع کنید به‌پیوست (ب)].

Ionization (**یونش**). فرایند کاهش (یا افزایش) الکترونهای اتمهای خنثی.

*Iso* (**هم**). پیشوند نشان دهندهٔ «تشابه».

Isomer (**ایزومر**). مولکولهایی باترکیب مشابه ولی ساختار متفاوت.

Isotactic (polymers) (**(پلی‌مرهای) تلک‌آرایش**). تکرار پردامنه‌درزنجیر پلی‌مر (درمقایسه با بی‌آرایش).

Isostatic molding (**قالبگیری ایزواستاتیک**).فشرده کردن‌گرد برای به‌دست آوردن شکل مطلوب، با استفاده از قالب لاستیکی و سیال هیدرولیکی (شکل ۸–۸–۱).

Isotherm (**همدما**). خط دمای ثابت.

Isothermal precipitation (**رسوب همدما**). تشکیل‌رسوب ازاشباع‌شدن در دمای ثابت.

Isothermal transformation (**تبدیل همدما**). تبدیل‌برحسب زمان توسط نگه‌داشتن در دمای ویژه.

Jominy distance (**فاصلهٔ جامینی**). سرعت‌سردکردن‌تعیین‌شده توسط آزمایش جامینی.

Junction (semiconductor) (**پیوندگاه (نیمرسانا)**). مرز بین نیمرساناهای نوع $n$ و نوع $p$.

Lattice (**شبکه**). ترتیب فضایی مکانهای معادل در بلور.

Lattice constants(**ثابت شبکه**).ابعاد سلول‌واحد.

Lever rule (inverse) (**قاعدهٔ اهرم (عکس)**). روش محاسبه برای تعیین فازها. ترکیب کلی درنقطهٔ اتکای اهرم است.

Light emitting diode, LED (**دیود نورگسیل**). وسیلهٔ پیوندی $p$-$n$ که برای تولید فوتونها توسط ترکیب مجدد طراحی شده است.

Lignin (**لیگنین**). جزء مهم بسیاری از چوبها؛ فشرده‌تر از سلولز.

Lineardensity (**چگالی خطی**). تعداد اجسام مثلا اتمها در واحد طول.

Lincar polymer (**پلی‌مر خطی**). رجوع کنید به‌پلی‌مرها.

Liquidus (**خط مذاب**). مرز دماکه بیشتر ازآن فقط مایع پایدار است.

Lone pair (**جفت‌الکترون تنها**). الکترونها در اربیتال نامتصل $sp^3$.

Long-range order(**نظم پردامنه**). الگوی تکراری در فواصل اتمی بسیار.

Low-alloy steels (**فولادهای‌کم‌آلیاژ**). رجوع کنید به steels

Luminescence **(لیانی)**. نور گسیل‌دارنده توسط ازدست‌دادن انرژی به‌صورت الکترونهای رسانشی دوباره ترکیب شده باشکافهای الکترونی.

Macromolecules **(ماکرومولکولها)**. مولکولهایی که از صدها تا هزارها اتم ساخته شده‌اند.

Macrostructure **(ماکروساختار)**. شکل‌ساختاری با بزرگنمایی خیلی کم (یا بدون بزرگ کردن).

Magnet, permanent (hard) **(مغناطیس دائمی (سخت))**. مغناطیس با حاصل انرژی زیاد ($BH$—)، به‌طوری که در حوزه به‌طور منظم قرار گیرد.

Magnet, soft **(مغناطیس نرم)**. مغناطیسی که برای به‌هم‌زدن نظم‌حوزه به‌انرژی قابل‌اغماضی نیاز دارد.

Magnetic saturation **(اشباع مغناطیسی)**. حداکثر خاصیت مغناطیسی که می‌تواند در ماده‌ای‌وجود داشته باشد.

Malleable cast iron **(چدن چکش‌خوار)**. چدنی که پس از انجماد گرافیتی‌شدن درآن صورت می‌گیرد. گرافیت به‌صورت «خوشه‌ای» وجود دارد.

Martensite **(مارتنزیت)**. فازمکعبی مرکزپر شبه‌پایدار آهن‌اشباع‌شده باکربن، که با دگرگونی برشی استنیت درحین آب‌دادن ایجاد می‌شود.

Materials balance **(موازنهٔ مواد)**. مواد محاسبهٔ عددی «کل برابر مجموع اجزاء».

Matrix **(زمینه)**. فاز پوششی که درآن فاز دیگری قرار می‌گیرد.

Mean ($\bar{x}$) **(میانگین)**. مقدار متوسط (رجوع کنید به Medion).

Mean free path **(میانگین مسیرآزاد)**. فاصلهٔ متوسطی که توسط الکترونها یا توسط موجهای کشسان همراه با انحرافها یا شکستها طی می‌شود.

Mechanical properties **(خواص مکانیکی)**. ویژگیهای مواد درمقابل نیروهای اعمال‌شده از خارج.

Mechanical working **(کارمکانیکی)**. شکل‌دادن با استفاده از نیروها.

Median $M$ **(میانه)**. مقدار وسط (رجوع کنید به mean).

Mer **(مر)**. کوچکترین واحد تکرار شونده در پلی‌مر.

Mesh **(شبکهٔ‌سرند)**. اندازهٔ سرند برای اندازه‌گیری ذرات.

Metal **(فلز)**. مواد تشکیل‌شده ازعناصری که قسمتی‌از الکترونهای‌ظرفیت‌خود را آزاد می‌کنند.(شکل ۲ـ۱ـ۱ را ببینید.) از ویژگیهای این‌مواد رسانندگی است که در دماهای بالا کاهش می‌یابد. موادی با باندهای ظرفیتی نیمهٔ پر شده.

Metallic bond **(پیوند فلزی)**. پیوند بین اتمی درفلزات که از ویژگیهای آن تغییرمکان الکترونها در نوارهای انرژی است.

Metallic conductor **(رسانای فلزی)**. ماده‌ای‌بارسانایی بیشتر از $1\Omega^{-1}m^{-1}$.

Metastability (**نیمه‌پایداری**). شرایط غیرتعادلی.

Mho (**مهو**). واحد رسانش؛ عکس اهم.

Microstructure (**میکروساختار**). ساختار دانه‌ها وفازها. معمولا برای رؤیت به‌بزرگنمایی نیاز دارد.

Miller indices ($hkl$) (**شاخصهای میلر** ($hkl$)). شاخص مربوط‌کنندهٔ صفحه به‌محور مرجع بلور. عکس محل تقاطع بامحورها.

Mixed particles (**ذرات مخلوط**). سنگ‌ریزه باپراکندگی اندازه.

Mixture (**مخلوط**). ترکیب دوفاز.

Mobility ($\mu$) (**تحرک**). سرعت رانـدن ($v$) بـار الکتریکی در واحد میدان الـکتریکی، $\mathcal{E}$، (m/sec)/(volt/m). شق دیگـر آن ضریب نفوذ بـار بـر ولت، $(m^2/sec)/volt$ است.

Modulus of elasticity (**مدول کشسانی**). تنش بر واحد کرنش. (مدول یانگ معمولیترین مدول کشسانی است که با آن برخورد می‌شود).

Modulus, bulk (**مدول کشیدگی**). فشار هیدروستاتیکی در واحدکرنش‌حجم.

Modulus, shear (**مدول برشی**). تنش برشی در واحدکرنش‌برشی.

Modulus, Young's (**مدول یانگ**). تنش‌محوری در واحدکرنش معمولی.

Molding (plastics) (**قالبگیری (پلاستیکها)**). شکـل‌دادن بـه‌وسیلهٔ قالب طرح‌دار.

Mole (**مول**). جرمی مساوی با وزن مولکولی یک‌ماده؛ $6.0 \times 10^{24}$ مولکول.

Molecular crystal (**بلور مولکولی**). بلورهایی حاوی مولکولهـا به‌عنوان واحد اصلی (در مقایسه با اتمها).

Molecular length (**طول مولکولی**). ریشهٔ میانگین طولی از یک سرتاسر دیگر.

Molecular size (**اندازهٔ مولکولی**). جرم یک‌مولکول (برحسب amu)، یا جرم $6.0 \times 10^{24}$ مولکول (برحسب گرم).

Molecular size (mass-average, $\bar{M}_m$) (**اندازهٔ مولکولی (میانگین جرمی، $\bar{M}_m$)**). میانگین اندازهٔ مولکولی براساس نسبت جرم.

Molecular size (number-average, $\bar{M}_n$) (**اندازهٔ مولکولی(میانگین تعداد، $\bar{M}_n$)**) میانگین اندازهٔ مولکولی براساس نسبت تعداد.

Molecule (**مولکول**). گروه محدودی از اتمها که توسط نیروهـای جاذبهٔ قوی به‌یکدیگر پیوند شده‌اند. پیوند بین مولکولها ضعیف است.

Molecules, linear (**مولکولهای خطی**). رجوع کنید به polymer.

Molecules, network (**مولکولهای شبکه‌ای**). رجوع کنید. به polymer.

Molecules, polar (**مولکولهای قطبی**). مـولکولهایی حـاوی دوقـطبی

الکتریکی دائمی.

Monel (**مونل**). آلیاژمس و نیکل.

Monomer (**مونومر**). مولکولی با یك مر تنها.

Multiphase microstructure (**میکروساختار چند فاز**). میکروساختار حاوی دو یا چند فاز مربوط بـه هم.

*n*-type (**نوع *n***). نیمرسانای دارای حامل بار منفی، یعنی الکترونها.

NaCl-type structure (**ساختار نوع NaCl**). ترتیبfcc یونها با یونهایی با بار مخالف هم در محلهای ۶ گانه.

Nernst equation (**معادلهٔ نرنست**). پتانسیل الکترود بهصورت تابعی ازغلظت الکترولیت.

Noble (**نجیب**). غیر فعال.

Nomenclature (AISI–SAE) (**نامگذاری فولادها** (AISI–SAE)). رجوع کنید بهجدول ۹ـ۹ـ۱.

Nonbridging oxygens (**اکسیژنهای غیرپلساز**). اکسیژنهایی که فقط بهیك چهار وجهی $SiO_4$ متصل‌اند و بدین ترتیب چهاروجهی را متصل بههم نگه نمی‌دارند.

Nonmetals (**غیرفلزات**). در درجهٔ اول شامل عناصری‌اند که درلایهٔ ظرفیتی خود الکترون می‌پذیرند یا بهاشتراك مـی گذارند. (شکل ۲ـ۱ـ۱ را ببینید.) از ویژگیهای آن تشکیل مولکولها یا آنیونهاست.

Nonstoichiometric compound (**ترکیب نااستوکیومتری**). ترکیباتی بانسبت غیر عدد صحیح اتمی (یا یونی).

Normal stresses (**تنشهای عمودی**). تنشهای عمود بر سطح.

Normalizing (**یکنواخت‌کردن**). گرمایش فـولاد تـا $\sim 50°C$ $(100°F)$ بهداخل گسترهٔ استنیت. بهطوری که میکروساختار دانه‌ریز یکنواختی درآن تشکیل شود.

Notch sensitivity (**حساسیت بهشکاف**). کاهش‌خواص‌باوجود تمرکز تنش.

Nucleation (**جوانه‌زنی**). آغاز رشد فاز جدید.

Octahedron (**هشت وجهی**). حجم هشت‌وجهی.

Orbital (**اربیتال**). احتمالات موجی الکترونهای اتمی و مولکولی.

Ordered crystal (**بلور منظم**). ساختاری با الگوی تکرار شوندهٔ پردامنه.

Orientation (polymers) (**جهتگیری (پلی‌مرها)**). فرایند کرنشی کـه توسط آن مولکولها در راستای ترجیح داده شده‌ای قرار می‌گیرند.

Orthorhombic (**مکعب مستطیل**). بلوری باسه‌محور نامساوی‌ولی عمودبرهم.

Over-aging (**فرتوت کردن**). ادامهٔ پیرسازی تاموقعی که نرم‌شدن آغاز شود.

Overtempering (**گرم‌کردن زیادی**). گرمایش اضافی برای ایجاد بههـم آمیختگی کاربیدها (و بنابراین نرم‌شدن) در مارتنزیت بازپخت شده.

Oxidation (general) **(اکسایش (کلی))**. افزایش سطح ظرفیتی عنصر.

Oxidation cell **(سلول اکسایش)**. رجوع کنید به Cell, oxidation.

*p*-type **(نوع *p*)**. نیمرسانای دارای حامل بارمثبت، یعنی شکاف الکترونی.

*p-n* junction **(پیوندگاه *p-n*)**. وسیله‌ای دارای مرز بین نیمرسانا‌های نوع *p* و نوع *n*؛ دیود یکسو کننده.

Packing factor **(ضریب فشردگی)**. حجم حقیقی بر واحد حجم ظاهری.

Passivation **(اثرناپذیرسازی)**. شرایطی که در آن از خوردگی معمولی توسط لایهٔ جذب کنندهٔ سطحی روی الکترود جلوگیری می‌شود.

Pearlite **(پرلیت)**. میکروساختار فریت و کاربید لایه‌ای با ترکیب اوتکتوییدی.

Periodic table **(جدول تناوبی)**. شکل ۲ـ۱ـ۱ را ببینید.

Phase (material) **(فاز (ماده))**. قسمتی از سیستم مواد که از نظر فیزیکی همگن است (بخش ۳ـ۵ را ببینید).

Phase, transition **(فازانتقالی)**. فاز شبه‌پایداری که به‌عنوان مرحله‌ای میانی در واکنش تشکیل می‌شود.

Phases, analysis of **(تجزیهٔ فازها)**. ترکیبات فازی که برحسب اجزای شیمیایی بیان شده‌اند.

Phases, quantity fraction of **(کمیت کسری فازها)**. ترکیبات مواد که برحسب کسر فازی بیان شده‌اند.

Phase boundary **(مرزفاز)**. عدم تداوم ترکیبی یا ساختاری بین دو فاز.

Phase diagram **(نمودار فازی)**. منحنی سطوح پایداری فاز بـا آنالیز و شرایط محیطی (معمولاً دما) طبق آنچه که هماهنگ شده است.

Phase diagram, isothermal cut **(برش همدمای نمودار فازی)**. قسمت دمای ثابت نمودار فازی.

Phase diagram, one-phase area **(ناحیهٔ تک‌فاز نمودار فازی)**. قسمتی از نمودار فازی که در آن هم‌دما و هم ترکیب شیمیایی فاز قابل تغییر است.

Phase diagram, two-phase area **(ناحیهٔ دوفاز نمودار فازی)**. قسمتی از نمودار فازی بعد از منحنی حد حلالیت. بنابراین فاز دومی لازم است، دمـا و ترکیب فازی نمی‌توانند همزمان باهم تغییر کنند.

Phase diagram, three-phase temperature **(دمای سه‌فازی نمودار فازی)**. دماهای غیرمتغیری که در آن سه‌فاز می‌توانند درکنار هم‌وجود داشته باشند.

Phenol-formaldehyde(PF) **(فنل فرم‌آلدئید(PF))**. فشرده‌شدن یا واکنش مرحله‌ای پلی‌مرفنل، $C_6H_5OH$ و فرم‌آلدئید $CH_2O$ (شکل ۷ـ۴ـ۱ را ببینید).

Phosphorescence **(فسفرسانی)**. لیانی که پس از برانگیخته‌شدن تا زمانی که دورهٔ آن سپری شود، باقی می‌ماند.

Photoconduction (**رسانش نوری**). رسانش ناشی از فعالسازی الکترونها و گذشتن آنها از شکاف الکترونی توسط نور.

Photon (**فوتون**). کوانتوم نور.

Piezoelectric (**پیزوالکتریك**). مواد دی‌الکتریك با ساختار قرینه، به‌طوری که مراکز بارهای مثبت و منفی روی‌هم منطبق نمی‌شوند. درنتیجه قطبیت به‌فشارهایی که فاصلهٔ دوقطبی را تغییر می‌دهند و به‌قطبش حساس است.

Planar density (**چگالی صفحه‌ای**). مواردی مثل‌اتم در واحد سطح.

Plastic constraint (**قید پلاستیکی**). جلوگیری از تغییرشکل پلاستیکی در مادهٔ نرم باحضور مادهٔ غیرنرم مجاور.

Plastic deformation (**تغییرشکل پلاستیکی**). تغییرشکل دائمی ناشی از تغییرمکان اتمها (یا مولکولها) به‌محل جدیدی درشبکه.

Plasticizer (**مادهٔ نرم‌کننده**). میکرومولکولهایی که به‌ماکرومولکولها افزوده می‌شوند تا تغییرشکل و انعطاف‌پذیری را القاکنند.

Plastics (**پلاستیکها**). موادی‌که عمدتاً حاوی مولکولهای‌بزرگی از عناصر یا ترکیبات غیرفلزی (رجوع کنید به polymers) صمغهای آلی قابل قالبگیری.

Point defect (**نقص نقطه‌ای**). نقص بلور شامل یك‌اتم (یامعدودی از اتمها).

Poisson's ratio ($\nu$) (**نسبت پواسون ($\nu$)**). نسبت (منفی) کرنش طولی به‌محوری.

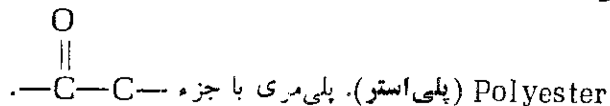
Polar group (**گروه قطبی**). دو قطبی الکتریکی ناحیه‌ای،در داخل مولکول پلی‌مر.

Polarization (chemical) (**قطبش (شیمیایی)**). تقلیل واکنشگرها در سطح کاتد، و بدین‌ترتیب کاهش جریان خوردگی.

Polarization (electric, $\mathcal{P}$) (**قطبش الکتریکی**). $\mu (= Qd)$ در واحد حجم.

Polarization (molecules) (**قطبش (مولکولها)**). تغییرمکان‌مراکز بارهای مثبت و منفی.

Polycrystalline (**چند بلوری**). موادی با بیش‌از یك بلور؛ بنابراین با مرزهای دانه.



Polyester (**پلی‌استر**). پلی‌مری با جزء —C—C—.

Polyethylene (**پلی‌اتیلن**). پلی‌مر $(C_2H_4)_n$.

Polyfunctional (**چندعاملی**). مولکول با سه یا چند محل که در آن امکان واکنشهای اتصالی بامولکولهای مجاور وجود دارد.

Polymer (**پلی‌مر**). مادهٔ غیرفلزی شامل ماکرومولکولهای (بزرگ) مرکب از

واحدهای تکرارشوندهٔ زیاد، نام‌فنی پلاستیکها.

Polymer (addition) **(پلی‌مر افزایشی)**. پلی‌مری که با شکستن پیونددوتایی و تبدیل آن به‌دو تك پیوند به‌وجودمی‌آید در این‌حالت مونومر به‌محل فعال زنجیر بزرگ شونده متصل می‌شود (پلی‌مرشدن با واکنش زنجیری).

Polymer (condensation) **(پلی‌مر تراکمی)**. پلی‌مر حاصل از واکنشی که در آن مولکول کوچك دیگری نیز به‌عنوان محصول فرعی به‌وجود می‌آید.

Polymer, linear **(پلی‌مر خطی)**. پلی‌مر مرهای دوعاملی.

Polymer,network **(پلی‌مر شبکه‌ای)**. پلی‌مری حاوی مرهای چندعاملی که ساختار سه‌بعدی تشکیل می‌دهد.

Polymorphism **(چندشکلی)**. ترکیبی با بیش‌از یك‌ساختار بلوری.

Pores, closed **(منفذهای بسته)**. منفذهای بدون دسترسی به‌محیط اطراف.

Pores, open **(منفذهای باز)**. منفذهای به‌هم مرتبط.

Porosity, apparent **(تخلخل ظاهری)**. $\frac{(\text{حجم منفذهای باز})}{\text{حجم کل}}$

Porosity,total **(تخلخل کل)**. $\frac{(\text{حجم منفذهای باز} + \text{حجم منفذهای بسته})}{\text{حجم کل}}$

Precipitation hardening **(رسوب سختی)**. سخت‌کردن با تشکیل خوشه‌هایی قبل‌از رسوب (پیرسختی نیز نامیده می‌شود).

Precipitation reactions **(واکنشهای رسوب‌کردن)**. خروج از محلول به‌علت فوق اشباع شدن.

Preferred orientation **(جهتگیری ترجیحی)**. منظم‌شدن بلورها یا مولکولها به‌صورت غیرتصادفی.

Pressing (ceramic) **(پرس‌کردن (سرامیکها))**. تجمع مواد دانه‌ای توسط فشار.

Primary bond **(پیونداولیه)**. پیوندهای بین‌اتمی قوی (>۲۰۰kJ/mole) از نوع کووالانسی یونی، یا فلزی.

Process anneal (steel) **(فرایند تابکاری مرحله‌ای (فولاد))**. بازپخت درنزدیکی دمای اوتکتویید ولی زیرآن.

Propagation **(گسترش)**. مرحلهٔ رشد پلی‌مر توسط واکنش: محل واکنش‌پذیر مونومر ← محل واکنش‌پذیر جدید.

Properties **(خواص)**. ویژگیهای کمی منتسب به‌موادمثل چگالی، استحکام، رسانایی.

Quantity fraction (phase mixtures) **(کسرمقدار (مخلوط فازی))**. ترکیب شیمیایی که برحسب فازها بیان شود.

Quartz (**کوارتز**). معمولترین فاز $SiO_2$.
Quench (**آب دادن**). سردکردنی که توسط تعلیق در روغن یا آب جریان‌دار شتاب می‌گیرد.
Radiation damage (**زیانهای حاصل از تشعشع**). نقایص ساختاری ناشی از در معرض تابش قرار گرفتن.
Radius ratio $(r/R)$ (**نسبت شعاعها** $(r/R)$). نسبت شعاع یونی کاتیونها، $r$، و آنیونهای همسایه، $R$.
Rate (solids) (**سرعت (جامدات)**). دگرگونی در واحد زمان.
Reactive site (□) (**محل واکنش‌پذیر (□)**). انتهای باز یک رادیکال آزاد.
Recombination (**بازترکیب**). نابودی جفتهای شکاف و الکترون.
Recombination time $(\tau)$ (**زمان بازترکیب** $(\tau)$). به relaxation time رجوع کنید.
Recovery (**بازیابی**). کمبود مقاومت یا رفتارهای مشابه که در هنگام کرنش سختی به‌وجود می‌آید، توسط از بین بردن نقایص نقطه‌ای با بازپخت (رجوع کنید به recrystallization).
Recrystallization (**تبلور مجدد**). تشکیل دانه‌های جدید بازپخت شده از دانه‌هایی که قبلا کرنش سختی شده‌اند.
Recrystallization temperature (**دمای تبلور مجدد**). دمایی که در آن تبلور مجدد خود به‌خود انجام می‌شود.
Rectifier (**یکسوکننده**). شیر یکطرفهٔ الکتریکی که اجازهٔ عبور جریان را به‌طرف جلو می‌دهد و از جریان عکس جلوگیری می‌کند.
Reduction (**احیا**). جدا کردن اکسیژن از اکسید؛ پایین‌آوردن سطح ظرفیتی عنصر.
Reduction of area (Red. of $A$) (**کاهش سطح مقطع**). اندازهٔ تغییر شکل پلاستیکی در نقطهٔ شکست.
Reinforcement (**تقویت‌کننده**). جزء مواد چندسازه با مدول کشسان بالا و استحکام زیاد.
Relative dielectric constant $(\kappa)$ (**ثابت دی‌الکتریک نسبی** $(\kappa)$). رجوع کنید به dielectric constant.
Relaxation (**افت**). از بین رفتن عامل خاصیتی.
Relaxation time $(\tau)$ (**زمان افت**). زمان لازم برای از بین رفتن مقدار متناسب با نما تا ۳۷٪ که برابر است با $1/e$ مقدار اولیه.
Residual stresses (**تنشهای باقیمانده**). تنشهای القاشده در نتیجهٔ اختلافات دما یا حجم.

Resistivity ($\rho$) **(مقاومت ویژه)**. عکس رسانندگی (معمولا برحسب اهم-متر بیان می‌شود).

Resistivity coefficient, solid-solution ($\rho_x$) **(ضریب مقاومت محلول جامد** ($\rho_x$)). مقاومت ناشی از افزایش جسم حل شونده.

Resistivity coefficient, thermal ($y_T$) **(ضریب مقاومت ویژهٔ گرمایی** ($y_T$)). مقاومت الکتریکی ناشی از آشفتگی گرمایی.

Resolved shear stress **(تنش برشی تفکیک‌شده)**. بردار تنش در صفحهٔ لغزش.

Rockwell hardness ($R$) **(سختی راکول** ($R$)). آزمایشی با استفاده از ساچمه؛ عمق فرورفتگی اندازهٔ سختی است.

Rolling **(نورد)**. کار مکانیکی بین دوغلتك مدور (شکل ۶-۲-۲).

Root-mean-square length **(طول ریشهٔ میانگین مربعات)**. طول آماری مولکولها ازیك سرتاسر دیگر.

Rubber **(لاستیك)**. مادهٔ پلی‌مر با کرنش تسلیم کشسان بالا.

Rubbery plateau **(ناحیهٔ لاستیکی)**. برای پلاستیك، گسترهٔ دما بین دمای شیشه‌ای و دمای ذوب که مدول ویسکوکشسان نسبتاً ثابتی دارد.

Sacrificial anode **(آند قربانی)**. فلز مصرف‌شونده‌ای که درمقابل فلزی که باید حفظ شود آندی است.

Schmid's law **(قانون اشمید)**. تنش محوری را به‌تنش برشی تفکیك شده مربوط می‌کند.

Schottky defect **(نقص شاتکی)**. جاهای خالی جفت‌یون.

Scission **(تجزیهٔ تشعشعی)**. فاسدشدن پلی‌مر توسط تشعشع.

Secondary bond **(پیوندثانویه)**. پیوندهای بین‌اتمی‌ضعیف(mole/kJ۴۰ <) ناشی از دوقطبیهای داخل اتمها یا مولکولها.

Segregation **(جدانشینی)**. ناهمگنی در ترکیب.

Self-diffusion **(خودنفوذی)**. نفوذ اتمها در ساختار خود.

Semiconductor **(نیمرسانا)**. ماده‌ای با رسانایی قابل‌کنترل، حدمتوسط بین عایقها و رساناها.

Semiconductor, compound **(ترکیب نیمرسانا)**. ترکیب دو یاچندعنصر با میانگین چهارالکترون مشترك در هراتم.

Semiconductor, defect **(نیمرسانای معیوب)**. انتقال نااستوکیومتری اکسیدهای فلز که رسانایی خود را از یونهای چندظرفیتی به‌دست می‌آورند.

Semiconductor, extrinsic **(نیمرسانای خارجی)**. نیمرسانا بودن به‌علت منابع ناخالصی.

Semiconductor, intrinsic (**نیمرسانای ذاتی**). نیمرسانایی مادهٔ خالص. الکترونها برای عبور از شکاف انرژی برانگیخته شده‌اند.

Semiconductor, *n*-type (**نیمرسانای نوع** *n*). ناخالصیها برای نوار رسانش الکترونهای **دهنده** تولید می‌کنند. این الکترونها حاملهای عمدهٔ بارند.

Semiconductor, *p*-type (**نیمرسانای نوع** *p*.) ناخالصیها از نوار ظرفیتی محلهای پذیرنده‌ای برای الکترونها به‌وجود می‌آورند. شکافهای الکترون حامل عمدهٔ بار است.

Shear strain ($\gamma$) (**کرنش برشی** ($\gamma$)). مماس برزاویهٔ برشی $\alpha$ که از تنش برشی به‌وجود می‌آید.

Shear stress ($\tau$) (**تنش برشی** ($\tau$)). نیروی برشی برواحد سطح.

Shear stress, critical (**تنش‌برشی بحرانی**). حداقل تنش تفکیک‌شده برای ایجاد برش.

Shear stress, resolved (**تنش برشی تفکیك‌شده**). بردار تنش در صفحهٔ لغزش.

Short-range order (**نظم‌کم دامنه**). ترتیب ویژهٔ اولین همسایه‌های اتم، ولی ترتیب نامنظم در دامنهٔ وسیع.

Sieve series (**مجموعه‌های سرند (غربال)**). یکی‌ازچندین‌مجموعهٔ‌استاندارد سرند یا شبکه‌های سرند برای تعیین توزیع اندازهٔ ذرات.

Silicate structures (**ساختارهای سیلیکاتی**).موادحاوی‌چهاروجهی $SiO_4$.

Silicates, chain (**سیلیکاتهای زنجیری**). سیلیکاتهای‌پلی‌مرشده بادواکسیژن از هرچهاروجهی که با دوچهاروجهی همسایه به‌اشتراك گذاشته می‌شوند تا ساختارزنجیر-مانندی به‌وجود آورند.

Silicates, network (**شبکهٔ سیلیکاتی**). ساختار سه‌بعدی سیلیکات بااشتراك اکسیژن در هر چهاروجهی.

Silicates, sheet (**سیلیکاتهای صفحه‌ای**). سیلیکات پلی‌مرشده باسه اکسیژن ازهر چهاروجهی که به‌اشتراك گذاشته می‌شوند تا ساختار صفحه‌ای شکل دوبعدی مثل میکا تولیدکنند.

Silicone (**سیلیس**). «سیلیکاتها»یی با رادیکالهای کناری آلی؛ بنابراین سیلیس براساس مولکولهای پلی‌مری تشکیل می‌شود.

Simple cubic (**مکعبی ساده**). سلول‌واحدمکعبی بامکانهای‌معادل‌فقط‌در‌رئوس.

Single-phase material (**مادهٔ تك‌فاز**). موادی شامل فقط يك‌ساختار کلی.

Sintering (**تفجوشی**). تجمع توسط عوامل گرمایی.

Sintering, liquid-phase (**تفجوشی فازمایع**). تجمع باعمل‌مویی مایع، و نفوذ از میان مایع (که بعداً منجمد می‌شود).

Sintering, solid (**تفجوشی جامد**). تجمع با نفوذ جامد.

$SiO_4$ tetrahedra (**چهاروجهی** $SiO_4$). واحد همسایگی چهار اکسیژن در اطراف یك اتم سیلیسیم.

Slip (ceramic processing) (**خمیر (انجام فرایند روی سرامیکها)**). دوغاب یا مواد معلق برای ریخته‌گری درقالب متخلخل به‌شکل محصول دلخواه. قالب‌مایع را جذب می‌کند.

Slip (deformation) (**لغزش (تغییرشکل)**). تغییرشکل برشی درامتداد صفحهٔ بلور.

Slip direction (**جهت لغزش**). جهت بردار تغییرمکان در بلور.

Slip plane (**صفحهٔ لغزش**). صفحهٔ بلوری که در آن لغزش صورت می‌گیرد.

Slip system (**سیستم لغزش**). ترکیب جهت لغزش روی صفحات لغزش که تنش برشی بحرانی کمی دارد.

Slip vector (**بردار لغزش**). فاصلهٔ تغییرمکان نابجایی. این بردار موازی نابجایی پیچی و عمودبر نابجایی لبه‌ای است.

Snell's law (**قانون اسنل**). قانون تفرق در مرزدانه (معادلهٔ ۱۰ــ۴ــ۱).

Soda-lime glass (**شیشهٔ سوداـآهکی**). شیشه‌ای که بیش از همه تولیدمی‌شود، اساساً برای پنجره و مخازن شیشه‌ای به‌مصرف می‌رسد، شامل $SiO_2/CaO/Na_2O$ به‌نسبت تقریبی ۱/۱/۶ است.

Solder (**لحیم**). فلزی که زیر ۴۲۵°C (~۸۰۰°F) ذوب می‌شود و برای اتصال به‌کار می‌رود. معمولا آلیاژهای Pb–Sn است ولی ممکن است مادهٔ دیگر، حتی شیشه نیز باشد.

Solid-phase reactions (**واکنشهای فازجامد**). واکنشهای شامل تغییر فاز در جامد است.

Solid solution, interstitial (**محلول جامد بین نشینی**). بلورهایی که در فضاهای خالی بین اتمهای خود جزء دیگری دارند. ساختار اصلی تغییر نمی‌کند.

Solid solution, ordered (**محلول جامد منظم**). محلول جامد جانشینی، در حالی که هریك از اجزاء، مکان شبکه‌ای ویژه‌ای را انتخاب می‌کنند.

Solid solution, substitutional (**محلول جامد جانشینی**). بلورهایی با جزء ثانویه که در ساختار اصلی جانشین اتمهای حلال می‌شود.

Solidus (**خط انجماد**). جمیع‌دماهایی که کمتر از آنها فقط‌جامد پایدار است.

Solubility limit (**حد حلالیت**). حداکثر مقدار جسم حل‌شدنی افزوده شده بدون فوق اشباع.

Solute (**جسم حل‌شده**). جزء کم‌محلول.

Solution (**محلول**). تك‌فازی شامل بیش از یك جزء.

Solution hardening **(سخت کردن محلولی، محلول سختی)**. افزایش استحکام ناشی از ایجاد محلولهای جامد (یا با جلوگیری از حرکت نابجاییها توسط اتمهای جسم حل شدنی).

Solution treatment **(محلول سختی)**. گرمایش برای ایجاد محلولهای جامد.

Solvent **(حلال)**. جزء اصلی محلول.

Specific gravity **(وزن مخصوص)**. نسبت چگالی ماده به‌چگالی آب.

Specific heat **(گرمای ویژه)**. نسبت ظرفیت حرارتی ماده به‌ظرفیت حرارتی آب.

Spheroidite **(ساختار کروی)**. میکروساختار کاربیدهای کروی درشت در زمینهٔ فریت.

Spheroidization **(کروی کردن)**. فرایند کروی کردن، معمولاً با حرارت دادن بیش از اندازه.

Spin (magnetism) **(اسپین (مغناطیس))**. حرکت دورانی فرضی الکترون در مدار داخل اتم.

Spinel **(اسپینل)**. ترکیبات مکعبی $[A_mB_nX_p]$ که در آن A دوظرفیتی و B سه‌ظرفیتی است. این ترکیبات معمولا در مغناطیسهای سرامیکی و برای نسوزها به‌کار می‌روند.

Spinning **(ورقکاری چرخشی)**. کار مکانیکی توسط سنبه برای ورق فلزی (شکل ۶-۲-۳).

Stamping **(منگنه کاری)**. فرایندکار مکانیکی در قالب روی ورق فلزی.

Standard deviation (SD) **(انحراف معیار (SD))**. مقدار انحراف داده‌ها.

Steel **(فولاد)**. آلیاژهای آهنی، عمدتاً حاوی کربن. درعمل کربن را می‌توان با عملیات گرمایی کاملا حل کرد، از این‌رو درصد وزنی کربن کمتر از ۲٫۰ است.

Steel, eutectoid **(فولاد اوتکتویید)**. فولاد با درصد کربنی که بعد از بازپختن ۱۰۰٪ پرلیت بدهد.

Steel, hypereutectoid **(فولاد هیپراوتکتویید)**. فولاد با کربن بیشتر از فولاد اوتکتویید؛ از این‌رو می‌تواند حاوی کاربید پرواوتکتویید نیز باشد.

Steel, hypoeutectoid **(فولاد هیپواوتکتویید)**. فولاد با کربن کمتر از فولاد اوتکتویید، از این‌رو می‌تواند حاوی فریت پرواوتکتویید باشد.

Steel, low-alloy **(فولاد کم‌آلیاژ)**. فولاد حاوی تا ۵٪ عناصر آلیاژی بجز کربن، تعادل فازی به‌نمودار Fe—C مربوط است.

Steel, plain-carbon **(فولاد ساده کربنی)**. اساساً آلیاژهای Fe—C با حداقل مقدار آلیاژ.

Steel, stainless **(فولاد زنگ‌نزن)**. فولاد پرآلیاژ (معمولا شامل Cr، یا Cr+Ni) که برای مقاومت در برابر خوردگی و/یا اکسایش طراحی شده است.
Steel, tool **(فولاد ابزار)**. فولاد با دماهای بازپخت بالا، معمولا شامل پایدارکنندهٔ کاربید مثل Cr، Mn، Mo، V، W.
Stereoisomers **(ایزومرهای فضایی)**. ایزومرهای پیکربندی پلی‌مرها.
Stereospecific **(فضا ویژه)**. پیوند کووالانسی بین جفت اتمهای ویژه (در مقایسه با جاذبه‌های کولنی غیرجهتدار).
Sterling Silver **(نقرهٔ استرلینگ)**. آلیاژ Ag ۵ر۹۲ و Cu ۵ر۷ (این تقریباً حداکثر حلالیت مس در نقره است).
Strain (*e*) **(کرنش (*e*))**. تغییرشکل توسط تنش اعمال شده.
Strain, elastic **(کرنش کشسان)**. تغییرشکل برگشت‌پذیر.
Strain, plastic **(کرنش پلاستیك)**. تغییرشکل دائمی به‌دنبال لغزش.
Strain, true (ϵ) **(کرنش حقیقی (ϵ))**. کرنش پلاستیك محاسبه‌شده براساس سطح مقطع در هرلحظه.
Strain hardening **(سخت‌کردن کرنشی، کرنش‌سختی)**. افزایش سختی (و استحکام) ناشی از تغییرشکل پلاستیك.
Strain point (glass) **(نقطهٔ کرنش، (شیشه))**. دمایی‌که‌در آن ویسکوزیته، η، شیشه برابر است با $10^{13.5}$Pa·s ($10^{14.5}$ پواز).
Strength **(استحکام)**. مقاومت در برابر تنشهای مکانیکی.
Strength, breaking **(استحکام‌شکست)**. تنش درهنگام شکست.
Strength, tensile ($S_t$) **(استحکام‌کششی ($S_t$))**. حداکثر بار در واحد سطح مقطع اولیه. این‌همان «استحکام نهایی» است که برای طراحی به‌کار می‌رود.
Strength, yield ($S_y$) **(استحکام تسلیم ($S_y$))**. تنش لازم برای ایجاد اولین نشانه‌های تغییرشکل پلاستیك.
Stress (*s*) **(تنش (*s*))**. نیرو برواحد سطح.
Stress concentration factor **(ضریب تمرکز تنش)**. افزایش تنش در شکاف.
Stress relaxation **(افت تنش)**. ازبین رفتن تنش در کرنش ثابت توسط تغییرنظم مولکولی.
Stress relief **(تنشگیری)**. از بین‌بردن تنشهای باقیمانده توسط گرمایش.
Stress rupture **(تنش-گسیختگی)**. گسیختگی برحسب زمان، حاصل از تنش ثابت (معمولا در دماهای بالا).
Structure **(ساختار)**. ارتباط هندسی اجزای مواد.
Supercooling **(فوق سرمایش)**. سردکردن تا زیر حدحلالیت بدون رسوب.

Surface (**سطح**). مرز بین فاز متراکم و گاز.
Symmetry (**تقارن**). ارتباط ساختاری اندازه، شکل، و موقعیت نسبی.
System (phase diagram) (**سیستم (نمودار فازی)**). ترکیب اجزای تعادلی.
System, International (**سیستم بین‌المللی**). استانداردهای تقریباً جهانی واحدها و ابعاد.
Temper (hardness) (**بازپخت (سختی)**). گسترش کرنش سختی.
Tempered glass (**شیشهٔ بازپخت‌شده**). شیشه باتنشهای فشاری در سطح که توسط عملیات گرمایی تولید می‌شود.
Tempered martensite (**مارتنزیت بازپخت شده**). میکروساختار فریت و کاربید که با گرمایش مارتنزیت به‌دست می‌آید.
Tempering (**بازپخت**). فرایند نرم‌کردن که در آن مارتنزیت تا ایجاد میکروساختار فریت به‌علاوهٔ کاربید گرما داده می‌شود.
Termination (**خاتمهٔ واکنش**). مرحلهٔ نهایی پلی‌مر کردن افزایشی. واکنش عمومی شامل اتصال محلهای فعال در سرهای رشدکنندهٔ دومولکول بزرگ شونده.
Tetragonal (crystal) (**راست‌وجهی (بلور)**). دو محور از سه محور مساوی‌اند؛ هرسه باهم زاویهٔ قائمه می‌سازند.
Tetrahedron (**چهاروجهی**). جامدی با چهاروجه.
Texture (**بافت**). ساختارهای ماکروسکوپی.
Thermal agitation (**آشفتگی گرمایی**). حرکت اتمها و مولکولها توسط گرما.
Thermal conductivity ($k$) (**رسانندگی گرمایی ($k$)**). ضریب بین شارگرمایی و شیب گرمایی.
Thermal diffusivity ($h$) (**نفوذپذیری گرمایی ($h$)**). ضریب نفوذ برای انرژی گرمایی، $k/\rho c_p$.
Thermal expansion (**انبساط گرمایی**). انبساط به‌سبب افزایش نوسانات اتمی حاصل از افزایش انرژی گرمایی.
Thermal expansion coefficient ($\alpha$) (**ضریب انبساط گرمایی**). $\left(\frac{\text{تغییر در ابعاد}}{\text{تغییر دما}}\right)$.
Thermistor (**ترمیستور**). وسیله‌ای نیمرسانا براساس ارتباط مقاومت بالا با دما. آن را می‌توان به‌صورت دماسنج نیز تنظیم کرد.
Thermocouple (**ترموکوپل**). وسیلهٔ اندازه‌گیری دما با استفاده از اثر ترموالکتریك سیمهای غیرمشابه.

Thermoplastic polymers (**پلی‌مرهای گرمانرم**). پلی‌مرهایی که در اثر گرما، نرم و قابل قالبگیری می‌شوند. با سردکردن سخت، ولی در حین چرخه‌های گرمایشی بعدی بار دیگر نرم می‌شوند.

Thermosetting polymers (**پلی‌مرهای گرما سخت**). پلی‌مرهایی که در اثر گرمایش بیشتر پلی‌مری می‌شوند؛ بنابراین گرما موجب می‌شود مجموعهٔ دیگری به‌آنها بپیوندد. در اثر گرمایش بعدی نرم نمی‌شوند.

Toughness (**چقرمگی**). مقدار انرژی لازم برای شکست مکانیکی.

Tracheid (**آوندهای ناقص**). ساختار سلولی بیولوژیکی چوب.

*Trans-* (**ترانس**). پیشوندی به‌معنی متقاطع (عکس سیس).

Transducer (**ترانسدیوسر**). ماده یا وسیله‌ای که انرژی را از یك‌شکل به‌شکل دیگر تبدیل می‌کند، خصوصاً انرژی الکتریکی به‌انرژی مکانیکی‌یا بر عکس.

Transformation temperature (**دمای تبدیل**). دمای تغییرفاز تعادلی.

Transistor (**ترانزیستور**). وسیلهٔ نیمرسانایی برای تقویت جریان.

Transition temperature (steels) (**دمای انتقال (فولادها)**). (گسترهٔ دمای تغییر از شکست انعطاف‌پذیر به‌شکست غیرانعطاف‌پذیر.

Translation (**انتقال**). تغییرمکان بردار بین مکانهای معادل شبکه.

Trifunctional (**سه عاملی**). مولکول با سه‌محل و[illegible] برای اتصال به مولکولهای مجاور.

Ultimate strength (**استحکام نهایی**). رجوع‌کنید به tesile strength.

Unitcell (**سلول واحد**). حجم تکرارشونده کوچك (یا کوچکترین حجمی) که شامل الگوی کامل شبکهٔ بلور می‌شود.

Unit mix (**مخلوط واحد**). نسبت‌سنگریزه، ماسه، و آب به‌سیمان پرتلند (۱ =) در مخلوط بتن. ممکن است براساس وزن یاحجم معین شود.

Vacancy (**تهیجای**). محل پرنشدهٔ شبکه.

Valence band (**باند ظرفیتی**). تراز انرژی‌پرشده زیرشکاف انرژی. رسانش دراین باند به‌شکافهایی نیاز دارد.

Valence electrons (**الکترونهای ظرفیتی**). الکترونهایی از پوستهٔ خارجی اتم.

Van der Waals forces (**نیروهای واندروالس**). پیوند ثانویهٔ ناشی از قطبش ساختار.

Vinyl-type compounds (**ترکیبات نوع‌وینیل**). جدول ۷-۲-۱ را ببینید.

Viscoelasticity (**ویسکوالاستیك**). ترکیب جریان‌کشسان و رفتار کشسان.

Viscoelastic modulus ($M_{ve}$) (**مدول ویسکوالاستیك** ($M_{ve}$)). نسبت تنش برشی به‌مجموع تغییرشکل کشسان، $\gamma_e$، و جریان ویسکوز، $v_f$.

Viscosity ($\eta$) (**ویسکوزیته**). نسبت تنش برشی به‌شیب (گرادیان)سرعت.
Viscous forming (**شکل‌دادن ویسکوز**). شکل دادن ترموپلاستیکی شیشه یا محصولات پلی‌مری.
Vitreous (**شیشه‌ای**). ازشیشه یا شیشه‌مانند.
Volume, apparent (**حجم ظاهری**). حجم حقیقی به‌علاوهٔ جاهــای خالی بسته (یاحجم کل منهای حجم جاهای خالی باز).
Volume, total(bulk) (**حجم کل ( حجم انباشتی)**). حجم‌حقیقی به‌علاوهٔ حجم جاهای خالی (هم باز و هم بسته).
Volume, true (**حجم حقیقی**). حجم ذاتی ماده (بدون حجم‌جاهای خالی).
Vulcanization (**وولکانش** ). عملیاتــی روی لاستیك توسط گوگــرد برای اتصال متقاطع زنجیرهای الاستومر.
Warpage (wood) (**تاب برداشتن (چوب)**). انقباض غیریکنواخت.
Wiedemann-franz ratio ($k/\sigma$) (**نسبت وایدمان ـ فرانتس $k/\sigma$**). نسبت رسانایی گرمایی به‌الکتریکی.
Wood, spring (**چوب بهاری**). دارای دانه‌هایی با آوندهای بزرگتر و با فشردگی کمتر.
Wood, summer (**چوب تابستانی**). دارای‌دانه‌هایی با سلولهای کوچکتر و با جدارهٔ ضخیمتر.
Working range (glass) (**گسترهٔ کار (شیشه)**). گسترهٔ دمــا واقع در بین ویسکوزیتهٔ $10^{2.5}$Pa.s تا $10^{6}$Pa.s.
X-ray diffraction (**تفرق اشعهٔ X**). روش تعیین فضاهــای بین صفحه‌ای بلورها.
Yield point (**نقطهٔ تسلیم**). نقطه‌ای روی‌منحنی تنش-کرنش باتسلیم پلاستیکی ناگهانی در آغاز تغییرشکل پلاستیکی (فقط در فولادهای کم‌کربن معمول است).
Young's modulus($E$) (**مدول‌یانگ($E$)**). به modulus of elasticity رجوع کنید.
Zener diode (**دیود زنر**). پیوندگاه $p$-$n$ با افت ولتاژکنترل شده تحت تأثیر بایاس عکس.
Zone melting (**ذوب ناحیه‌ای**). فرایند خالص‌کردن بــا استفاده از تجمع توسط انجماد جهتدار.

# فهرست راهنما

مرکز نشر دانشگاهی

www.iup.ir

ISBN:978-964-01-0618-1





۶۳۰۰ تومان